# MUNDO CIENTIFICO

LA RECHERCHE

Nº 175 • Enero 1997 • 675 Ptas.

## Los nuevos ordenadores cuánticos

## Las primeras comunidades europeas: Atapuerca

## El esqueleto de las células

## Moléculas de tamaño infinito

# LA NATURALEZA Y LOS INDIOS DEL AMAZONAS

## Una visión antropológica

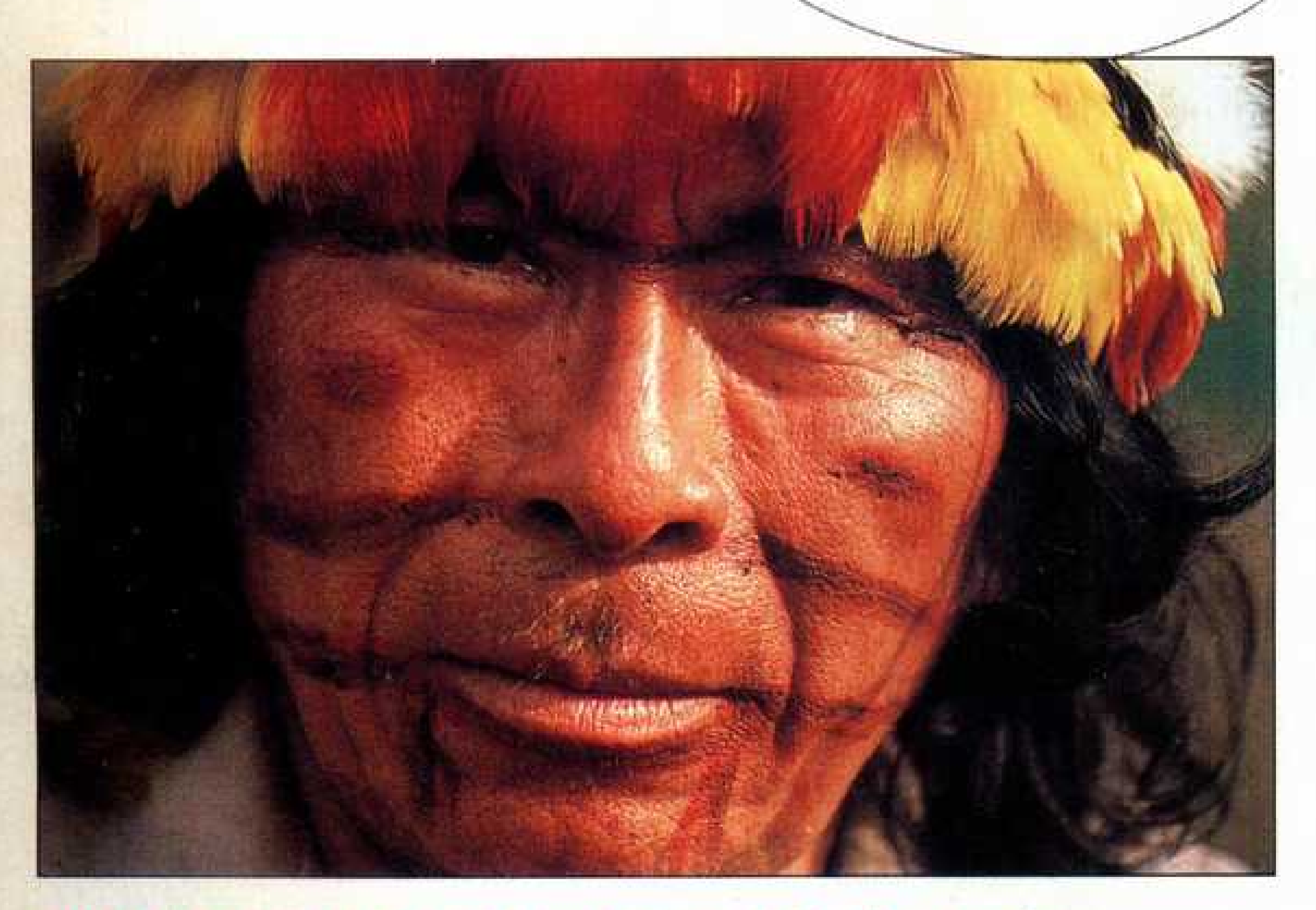





# SUMARIO Nº 175, ENERO 1997



**14. Las incertidumbres de la era postamianto.** Toxicólogos y epidemiólogos tardan en ponerse de acuerdo sobre la inocuidad de los materiales de sustitución del amianto.



**44. El ordenador bajo el encanto cuántico.** Puntos de vista cruzados de informáticos y físicos sobre las perspectivas de este nuevo medio de cálculo.

**60. Las cosmologías de los indios de la Amazonia.** Para estos indios la naturaleza es una construcción social.



**92. Convocatorias y becas.** Dedicada a la información de todo aquello concerniente a convocatorias y becas, acompañada de direcciones de interés.

## BREVES

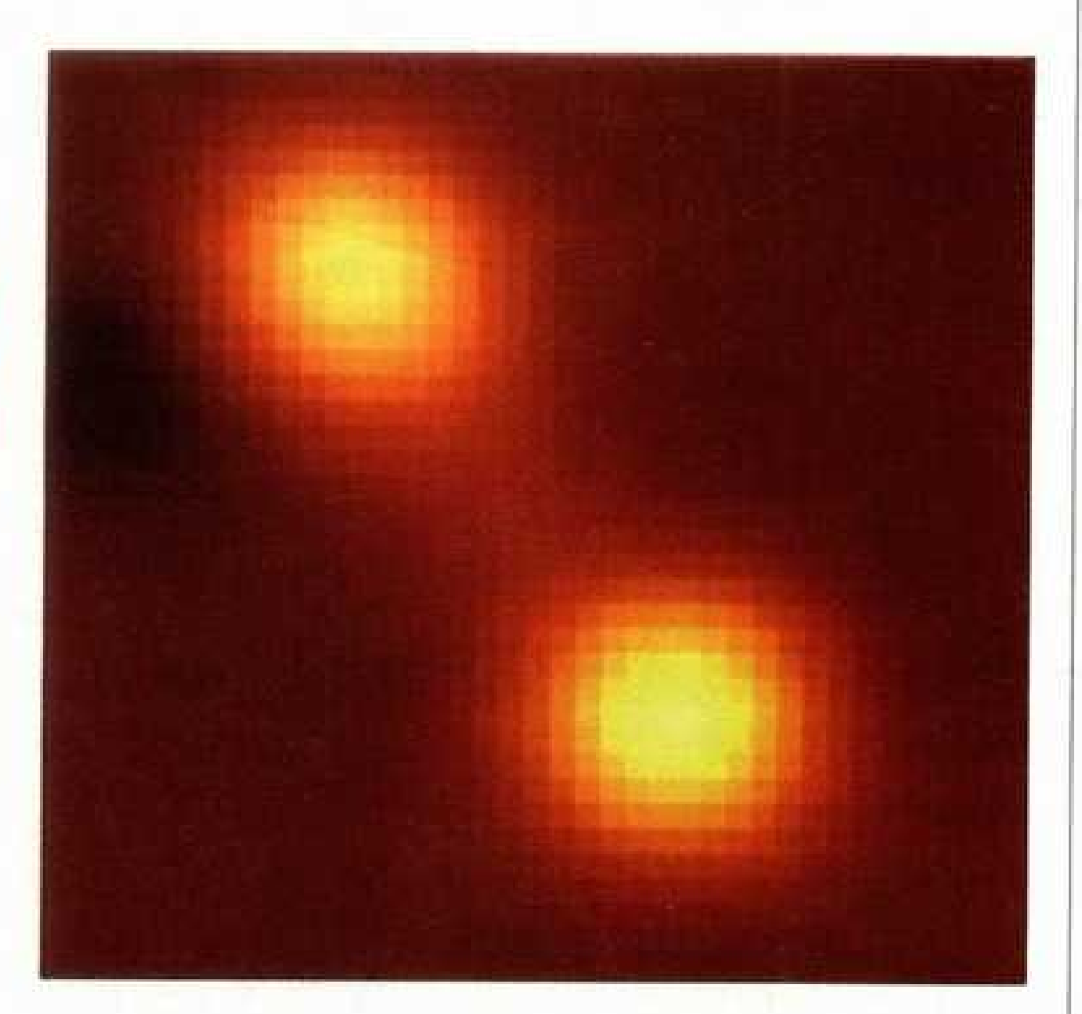


## ARTÍCULOS

SUMARIO



**54. Instrumentos de los homínidos de Atapuerca.**
Los restos de homínidos más antiguos descubiertos en Europa.



**66. Interferometría óptica: luces y sombras en el Universo.**
La distancia angular que separa a las estrellas de la constelación del Cochero.



**80. Amable Liñán:** investigador de la combustión. Una entrevista con Amable Liñán, catedrático de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.



**5. Los investigadores destrozan locomotoras.**
Un banco de ensayos para probar la resistencia a las colisiones de los vehículos ferroviarios.

# AZOTEA ECOLÓGICA AUTOGESTIONADA

***Utilizar las azoteas de los edificios como campos de cultivo de especies vegetales que se desarrollen sin un cuidado especial es el propósito del proyecto de investigación Cubierta Ecológica Experimental Monotorizada, en el que participan la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid, junto con otros organismos públicos y privados.***



Los trece módulos experimentales, situados en la azotea de uno de los edificios de Agrónomos, disponen de unos sensores que permiten hacer el seguimiento en tiempo real y vía INTERNET, accesible a los investigadores involucrados en el proyecto, de toda una serie de factores que rodean a la Cubierta Ecológica como son la búsqueda de materiales de construcción adecuados, impermeabilización, capacidad de aislamiento térmico y acústico del binomio sustrato-planta, efectos sobre las radiaciones térmicas de la construcción y estudio de los fenómenos magnéticos en el crecimiento de las plantas.

En el Seminario desarrollado en noviembre, Naturación Urbana se expuso de manera sistemática los beneficios y problemas de estas cubiertas ecológicas de las que hay trabajos muy avanzados en Alemania (el 20 % de los nuevos edificios tienen en cuenta la posible conversión de su azotea en ecológica), liderados por la Universidad Humboldt de Berlín.

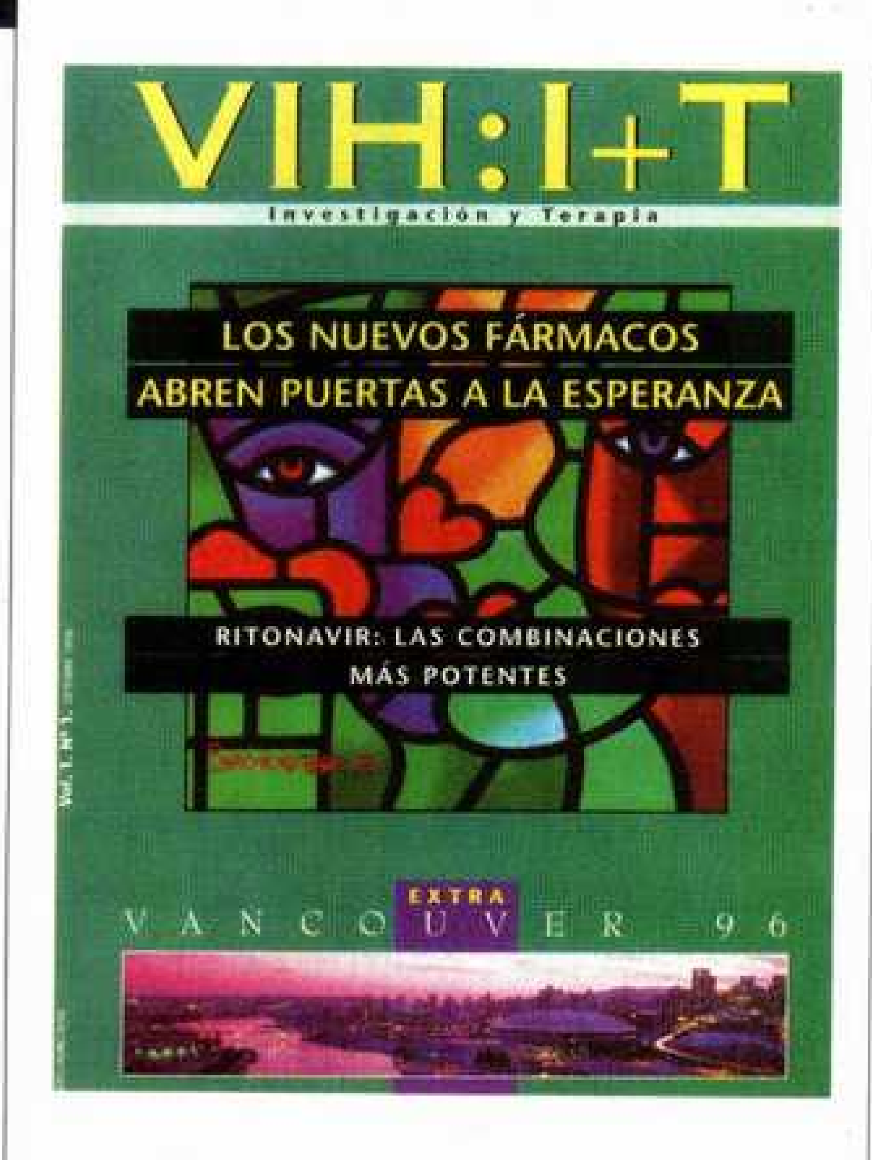
Los *tejados verdes* encierran dentro de su aparente sencillez el problema de encontrar para cada ocasión las especies vegetales adecuadas y los sustratos ligeros de peso compatibles con cada tipo de plantas. Teniendo siempre presente que estas cubiertas ecológicas deben implicar un mantenimiento mínimo, prácticamente nulo, sin abonos ni irrigacción artificial.

**Para más información:**
Dr. Julián Briz Escribano.
Catedrático Departamento de Economía y Ciencias Sociales Agrarias.
ETS Ingenieros Agrónomos de Madrid.
Ciudad Universitaria.
28040. Madrid.
Tel. (91) 336 57 91.
Fax (91) 336 57 97.
Correo electrónico:
JBRIZ@eco.etsia.upm.es

## Nuevo medicamento contra el sida

La aparición de un nuevo medicamento contra el sida siempre es una buena noticia. Ritonavir, de Laboratorios Abbot, es el primer inhibidor de la proteasa del VIH (Virus de Inmunodeficiencia Humana) que ha recibido la autorización del Ministerio de Sanidad para su venta en España, donde se venía suministrando desde hacía unos meses como medicación extrajera, y ha sido también el primero en recibir, en agosto pasado, la aprobación de la Comunidad Europea para su comercialización en el Continente.

Pero Ritonavir no es el único inhibidor de la proteasa, hay varios en el mercado internacional, por ejemplo,




Indinavir (Merck) y Saquinavir (Hoffmann-La Roche), lo que es bueno para los enfermos que se benefician así de la competencia entre laboratorios.

Los laboratorios Abbot aprovecharon la presentación de su nuevo medicamento para dar a conocer también el primer número de la revista *VIH: I+T, Investigación y Terapia*, en la que reúne una buena colección de artículos, entrevistas y reportajes con el sida como protagonista de actualidad.

Por ejemplo, en la información «Sombrío panorama mundial» se reconoce el hecho que la pandemia de VIH/sida afecta en estos momentos a cerca de 22 millones de personas en el mundo, destacando África subsahariana con 12.000.000 de infectados.

En otra información se dan los últimos datos de casos de sida en nuestro país, que ya supera la cifra de 40.000, siendo la primera causa de muerte en el grupo de edad entre los 25 y 39 años.

**Para más información:**
Abbot Laboratories.
Josefa Valcárcel 48.
28027 Madrid.
Tel. (91) 337 52 00.
Fax (91) 337 53 06.

## Láser con plástico

Tres equipos de investigadores, uno de Gran Bretaña y dos de Estados Unidos, han logrado obtener un efecto láser con polímero a modo de medio ópticamente activo (N. Tessler *et al. Nature*, 382, 695, 1996; F. Hide *et al. Science*, 273, 1.833, 1996). En todo láser el medio óptico está insertado entre dos espejos enfrentados. Una excitación apropiada de este material provoca la emisión de fotones, quienes inducen la emisión de otros fotones y así sucesivamente.

En estas experiencias el medio óptico es una película de plástico cuyo espesor es del orden de la longitud de onda de la luz (es decir, menos de una micra), configuración que permite una «resonancia» propicia al efecto láser.

Los resultados de estos tres equipos merecen ser remarcados ya que los polímeros —o plásticos— son materiales relativamente baratos. Por otro lado, como se trata de moléculas que pueden ser modificadas a voluntad, estos láseres podrían ser utilizados a diferentes longitudes de onda. Interesante, cuando se sabe que los láseres azules no están aún a punto.

Pero no vayamos tan deprisa: las emisiones de luz obtenidas con plásticos no poseen aún todas las características de un verdadero láser (falta, en particular, la «coherencia» del haz). Además, el polímero es excitado mediante otro láser. Para conseguir un instrumento útil, sería necesario que la excitación se realizase mediante una corriente eléctrica, pero los polímeros son vulnerables a la misma y no transforman los electrones en fotones con demasiada eficacia. El camino a recorrer es aún largo.

## El genoma común más pequeño

¿Cuál es la talla mínima que debe poseer un genoma de célula (bacteria, célula animal o vegetal) para vivir? Trescientos quince mil pares de bases (la unidad elemental del DNA), según Arcady Mushegian y Eugene Koonin, de los National Institutes of Health en Estados Unidos (*Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93, 10.268, 1996). Para llegar a estas conclusiones, los investigadores compararon el genoma de dos bacterias: el de *Mycoplasma genitalium*, el genoma más pequeño conocido hasta el momento, y el de un primo lejano, *Haemophilus influenzae* (responsable de infecciones respiratorias y de meningitis en los niños).
M. *genitalium* y *H. influenzae* se separaron de su ancestro común hace alrededor de 3.200 millones de años. Hoy su genoma está compuesto por 468 y 1.703 genes, respectivamente.
Para el recuento de los genes importantes para la vida de la célula, los investigadores retuvieron aquellos cuya función se encuentra a la vez en M. *genitalium* y *H. influenzae*.
El estudio revela que las dos bacterias contienen 256 genes de funciones comparables (233 tienen igualmente secuencias similares). Eliminando de los 256 genes los presentes en muchos ejemplares así como aquellos específicos del modo de vida parasitaria de las dos bacterias, Mushegian y Koonin han conseguido un genoma compuesto de 250 genes. Esto representa, según ellos, una buena aproximación al genoma mínimo. Perseverando en este método de reducción, esperan encontrar la «célula ancestral primordial» que está en el origen de los tres reinos actuales del mundo viviente: *archaea*, bacterias y eucariotas.

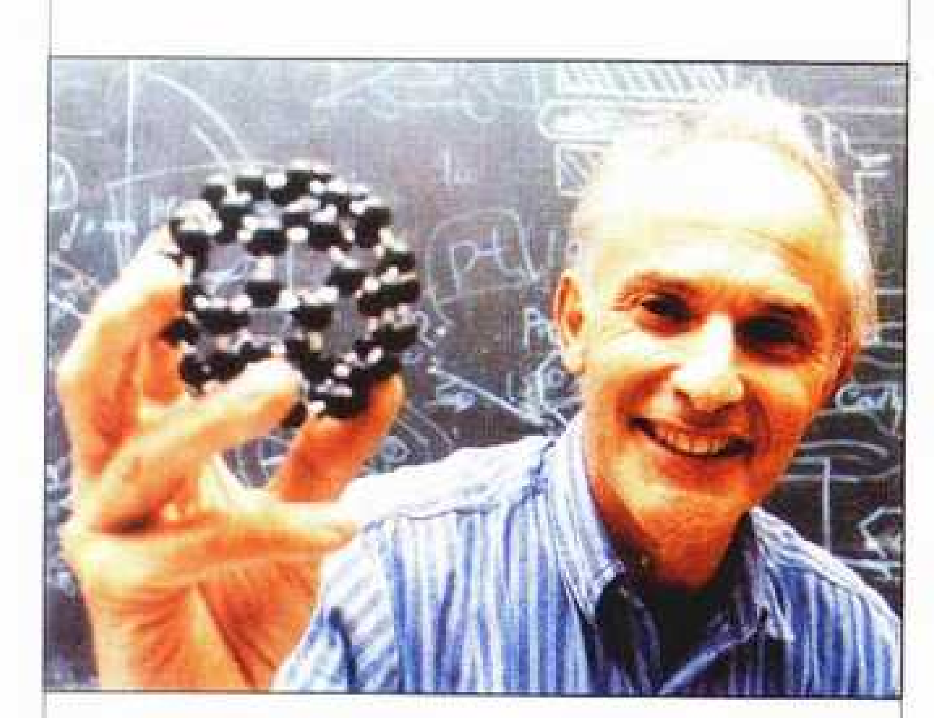
# PREMIOS NOBEL 1996

### QUÍMICA

## La coronación de los fullerenos

El Premio Nobel de este año ha sido concedido a los descubridores del $C_{60}$, una bola molecular que contiene 60 átomos de carbono: Sir Harold W. Kroto, que enseña en la Universidad de Sussex, en Gran Bretaña, Robert F. Curl y Richard E. Smalley de la Universidad Rice de Houston, en Estados Unidos. No fue del todo una sorpresa puesto que ya habían sido nominados el año anterior. A principios de los años 1980, H. Kroto buscaba sintetizar, en su laboratorio de Sussex, moléculas interestelares carbonadas. Teóricos rusos y norteamericanos habían emitido la hipótesis de que las formas moleculares del carbono, desconocidas hasta el momento, debían existir. Pero nadie las había observado.
Las manipulaciones precisaban vacíos elevados y altas temperaturas y Kroto realiza algunas experiencias al otro lado del Atlántico, junto a Richard E. Smalley. Este eminente especialista en agregados metálicos había puesto a punto un sistema de pulverización de materiales bajo un haz láser. Es mediante este mismo procedimiento que los investigadores producen en 1985 algunas fracciones de microgramo de $C_{60}$: el primer representante de una nueva clase de moléculas que los investigadores denominarán «fullerenos», en referencia a las cúpulas construidas en los años 1950 por el arquitecto americano Buckminster Fuller.
Los fullerenos tienen propiedades muy interesantes y podrían utilizarse próximamente en la fabricación de pantallas protectoras contra los alumbramientos intensos o como lubricantes. Algunos cientos de patentes han sido ya depositadas (principalmente en Japón, Estados Unidos y Alemania), pero los fullerenos están aún lejos de haber mostrado todos sus secretos.
El aviso de Patrick Bernier, de la Universidad de Montpellier.

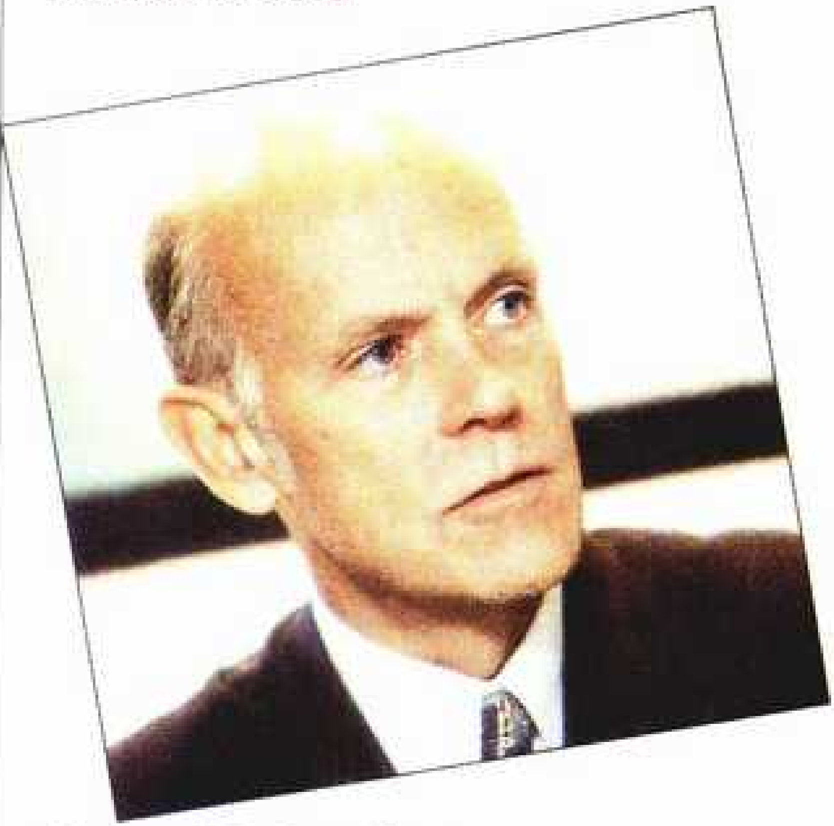
F.L. ■



Sir Harold W. Kroto



Robert F. Curl



Richard E. Smalley

*Mundo Científico* ha publicado:
«Los fullerenos, moléculas fabulosas», nº 127, septiembre, 1992.
«Los cristales de fullereno», nº 133, mayo, 1993.

### MEDICINA

## Lo propio, lo ajeno y los virus

Pilar del sistema de reconocimiento de lo propio y de lo ajeno, el complejo mayor de histocompatibilidad (CMH) valió en 1980 el Nobel de medicina a sus descubridores, uno de ellos fue Jean Dausset. Este año es por haber demostrado el papel del CMH en la respuesta inmunitaria contra los virus —y no solamente por el rechazo de injertos— que han sido premiados el australiano Peter C. Doherty (St. Jude Children's Research Hospital, Memphis, Tennesse) y el suizo Rolf M. Zinkernagel (Universidad de Zurich). Entre 1973 y 1975, los dos jóvenes investigadores, de 30 años, se encontraban en Canberra donde llevaban a cabo sus experiencias con ratones. Se interesan en la forma en que el sistema inmunitario reconoce las células infectadas por un virus, en el caso de la coriomeningitis leucocitaria. Resultado: los limfocitos T no destruyen las células infectadas si estas últimas llevan en su superficie las proteínas propias. De ahí el concepto de «presentación del antígeno»: un componente viral sólo es reconocido si se presenta en la superfície de células en asociación con los productos del CMH. El principio se ha revelado fundamental en el funcionamiento del sistema inmunitario. Es válido igualmente para el reconocimiento de células cancerígenas y se toma ahora en consideración para la concepción de nuevas vacunas antivíricas o antitumorales. La descripción del fenómeno a nivel molecular data de los años 1980. Es, de hecho, la primera etapa de este descubrimiento lo que el comité Nobel ha escogido consagrar.

L.S. ■



Peter C. Doherty



Rolf M. Zinkernagel

*Mundo Científico* ha publicado:
«El maravilloso porvenir de las vacunas», nº 159, julio, 1995.
«Activar la inmunidad para combatir el cáncer», nº 139, octubre, 1993.
«Los mensajeros de la inmunidad», nº 60, julio, 1986.
«Sida: inmunidad y vacunas», nº 76, enero, 1988.
«Cerebro e inmunidad: la relación se confirma», nº 80, mayo, 1988.

## FÍSICA
# La superfluidez del helio 3

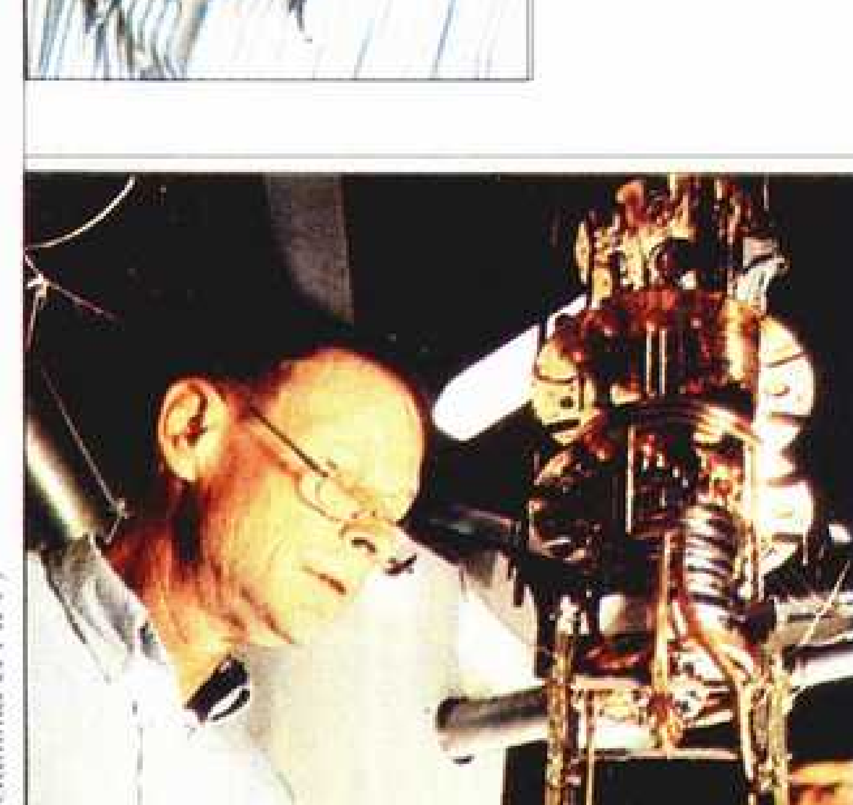
En 1972, David M. Lee, Douglas C. Osheroff y Robert Richardson, los tres norteamericanos



**David M. Lee**



**Douglas C. Osheroff**



**Robert Richardson**

laureados con el Premio Nobel de Física de 1996, se encontraban en la Universidad de Cornell. Enfriaron una muestra de helio 3 a una temperatura récord de algunas milésimas de grado por encima del cero absoluto (−273,15 °C). Constataron ciertas anomalías en la velocidad de enfriamiento y creyeron haber descubierto una transición de tipo magnético del helio sólido que, según habían predicho algunos teóricos, debería tener lugar cerca de 1 o 2 milikelvin. De hecho, los tres físicos comprendieron en seguida que las anomalías procedían del líquido. Acababan de poner de manifiesto, por debajo de 2,7 milikelvin, el estado superfluido del helio 3. Esta condensación de origen cuántico, que hace perder al líquido su viscosidad, era conocida desde 1938 para el helio 4 (átomos con 2 protones y 2 neutrones) por debajo de unos 2 kelvin. Para el helio 3 (un solo neutrón) dicho fenómeno se esperaba desde hacía una quincena de años, desde que se explicó la superconductividad en términos del apareamiento de los electrones. Así pues, esta teoría se adapta también a los átomos de helio 3. El descubrimiento de 1972 abre un nuevo campo de investigación, dado que el helio 3 superfluido es mucho más complejo que su homólogo el helio 4. Existe en muchas fases, caracterizadas por propiedades de simetría diferentes. Se le han encontrado semejanzas, desde el punto de vista matemático, con los superconductores aunque también con los cristales líquidos y con ciertos fenómenos cósmicos. Las primeras «experiencias cosmológicas» realizadas, hace algunos meses, con el helio 3, son una muestra sorprendente. **M.M.** ■

*Mundo Científico* ha publicado:

«Un gas cuántico casi perfecto», nº 46, abril, 1985.
«Las turbulencias en los superfluidos», diciembre de 1991.

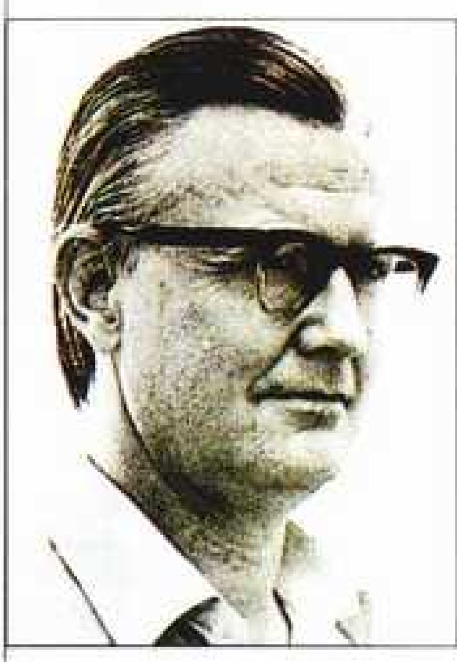
(Fotos: Química: Gamma/Sygma/Gamma; Medicina: Sygma; Física: Gamma/Sygma/Gamma; Economía: Gamma et AFP)

## ECONOMÍA
# La información asimétrica

Así puede resumirse, de forma esquemática, la cuestión sobre la que empezó a trabajar William Vickrey en los años 1940 y después James A. Mirrlees, un cuarto de siglo más tarde, en la línea del primero.
Las situaciones de «información asimétrica» son legión y su dominio es más complejo que una relación oferta/demanda aplicada a la compra de un bien: el banquero sabe menos acerca de las rentas del que pide prestado que este último; los accionistas de una empresa saben menos que su director; el asegurador no controla el comportamiento de sus asegurados, etc. Ciertas incitaciones pueden ser eficaces. Por ejemplo, ¿qué hacer, por una parte, para que los que contratan un seguro presten tanta atención a sus bienes como la que les prestarían si no estuviesen asegurados y, por otra, incitar a los cuadros de la compañía a administrar el negocio como si se tratase de su propio dinero? Respuesta: incluir en los contratos de unos y otros cláusulas que hagan padecer los siniestros e inversamente. Es por haber aportado este tipo de respuestas teóricas y prácticas en estos temas por los que ambos autores acaban de recibir de la Academia



**William Vickrey**



**James A. Mirrlees**

de Ciencias de Estocolmo (no un «Premio Nobel de Economía», que no existe) «el Premio de Ciencias Económicas de la Banca de Suecia en memoria de Alfred Nobel». James A. Mirrlees (*), de 60 años, nacido en Minnigaff en Escocia, enseña en el Departamento de Economía y Política de Cambridge. William Vickrey (*), 82 años, nacido en Victoria en Canadá, es profesor emérito de la Universidad de Columbia en Nueva York.

**E.R.** ■

(*) Últimas publicaciones:
James A. Mirrlees, *Bell Journal of Economics*, 7, 105-131.
Willian Vickrey, *American Economic Review*, 59, 251-260.

***Nueva campaña antártica española***

*Arropado por el Plan Nacional I+D, a través del Programa Nacional de Investigación en la Antártida, que coordina la línea de investigación y ofrece el soporte económico necesario para esta aventura científica en el otro lado del mundo, se inicia la campaña antártida 1996-1997.*
*Una cincuentena de personas, incluyendo algunos investigadores extranjeros, desarrollarán estudios geológicos, botánicos, faunísticos y de seguimiento del ozono estratosférico, en las Bases Juan Carlos I (Isla Livingston) y Gabriel de Castilla (Isla Decepción) así como en otros territorios antárticos.*
*Estos científicos y técnicos proceden de catorce organismos (españoles y extranjeros).*
*Uno de los propósitos de esta campaña es que el equipamiento científico funcione de forma autónoma durante el invierno cuando las instalaciones se encuentran deshabitadas. Para ello se ampliará el soporte de generación de energía solar y eólica. También se instalará un nuevo equipo de comunicaciones.*
*Por primera vez los científicos tendrán que presentar una evaluación preliminar del impacto ambiental que sus actividades pudieran provocar y que incluye, por ejemplo, los productos químicos y radioisótopos que van a ser utilizados. De igual manera hay que considerar en el informe todo lo relacionado con el estudio y manipulación de la fauna, recolección de flora, y toma de muestras rocosas.*
*Científicos españoles contarán con el apoyo logístico de otros países para un estudio geomorfológico y también estarán presentes en la campaña antártica de Argentina.* **I.B.** ■



*Parte de los científicos se desplazan a la Antártida en el buque oceanográfico Hespérides. (Foto autor.)*

# ¿LA HOMEOPATÍA EN EL SENO DE LA CIENCIA?

*Sujeto de controversias sin fin, la homeopatía celebra este año el bicentenario del artículo fundador obra de Samuel Hahnemann. Pero el acontecimiento lo ha creado un informe financiado por la Comisión Europea. En él se expresa un sorprendente consenso: la homeopatía puede ser objeto de una evaluación científica. Queda ponerlo en práctica...*

Hasta el momento, defensores y adversarios de la homeopatía sólo se ponen de acuerdo en un punto: existe una diferencia irreductible que distingue medicinas homeopáticas y alopáticas, no soportarían criterios de evaluación similares. Por ejemplo, la simple idea de someter un medicamento homeopático a un ensayo clínico a ciegas, suscita una gran hostilidad. Por un lado, los defensores de la homeopatía arguyen la especificidad de su modo de prescripción para rechazar este tipo de ensayos. Por otro, sus adversarios estiman que es inútil gastar tiempo y dinero para evaluar un producto del cual nadie ha podido jamás explicar el modo de acción. Con el objetivo de armonizar las legislaciones europeas sobre medicamentos, el Parlamento Europeo ha querido dejar las cosas claras. La Comisión Europea ha destinado un presupuesto de un millón de ECUS y ha reunido a un grupo internacional de dieciséis expertos de todas las tendencias: homeópatas que poseen una actividad investigadora,

NOS QUEDA CONVENCER A NUESTRAS FAMILIAS.

Homeo & Alopatía

PESSIN

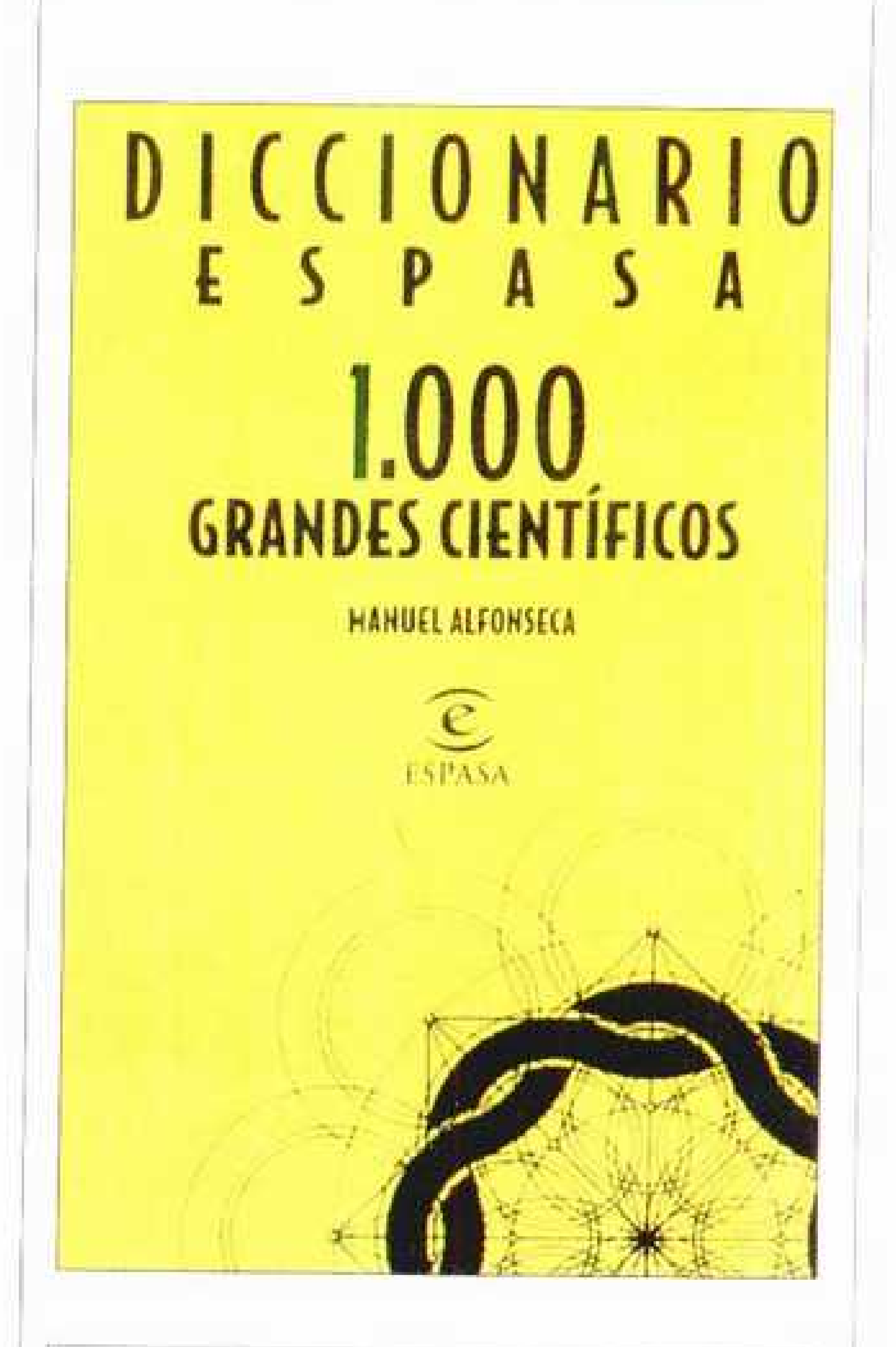
# Un diccionario de científicos que puntúa las biografías



El *Diccionario Espasa. 1.000 grandes científicos*, del profesor de Ingeniería Informática de la Universidad Autónoma de Madrid, Manuel Alfonseca, es mucho más que una colección de biografías al uso. Alfonseca ha tenido el atrevimiento de puntuar a los científicos lo que añade, sin duda, polémica a la obra. Un *Diccionario* que tiene el mérito de empujar al lector a reflexionar sobre el significado de los descubrimientos científicos y el juicio que merece a la Historia aquellos hombres y mujeres (por cierto sólo trece de los mil grandes científicos son mujeres) que han dedicado su vida a la Ciencia. En su particular evaluación, no exenta de riesgo, Alfonseca ha seleccionado automáticamente los 436 científicos que han recibido el Premio Nobel y para completar el listado hasta 1.000 —ninguno nacido después de 1950— ha utilizado enciclopedias de distintos países (*Espasa, Britannica, Durvan, Santillana, Concise Encyclopedia of Sciences, Larousse*), puntuando a cada científico de 1 a 8, «a base —responde Alfonseca— de contar las líneas que les dedican las enciclopedias, lo que da una posibilidad de cuantificar su importancia».

**¿Se puede cuantificar la ciencia?**

Alfonseca fiel a su método —y también rehén— ha resistido las tentaciones de maquillar calificaciones pues algunos científicos aparecen puntuados por exceso o por defecto de lo que, en principio, podría considerarse razonable. Pero el método es el método, está por encima del bien y del mal, y hay que ceñirse a él caiga quien caiga.«Si yo me ponía —comenta Alfonseca— a hacer correcciones personales, ¿dónde quedaba la objetividad? Así que decidí no hacer ninguna corrección. Lo que saliera, salía.» No obstante, y a propósito de si es posible cuantificar la historia de la ciencia, escribe Alfonseca en la Introducción de su *Diccionario*: «Muchos historiadores responderán negativamente a esta pregunta, aduciendo que los sucesos históricos son únicos e irrepetibles y reaccionando con extrema sospecha ante cualquier intento de descubrir leyes o recurrencias en este tipo de fenómenos... Para encontrar estudios cuantitativos es preciso recurrir a autores ajenos a la profesión de historiador». El *Diccionario* contiene varios índices: cronológico, temático, por países, Premios Nobel, y de referencias cruzadas entre biografías. Todo esto facilita la comprensión en conjunto de los descubrimientos lo que puede animar al lector a buscar con rapidez conclusiones propias sobre la Historia de la Ciencia.




**Para más información:**
Dr. Manuel Alfonseca.
Dpto. Ingeniería Informática.
Universidad Autónoma de Madrid.
Ctra. de Colmenar km 15.
28049 Madrid.
Fax (91) 397 52 77.

especialistas en investigación clínica y farmacológica y bioestadísticos y epidemiologistas. Georges Fülgraff, profesor alemán de salud pública que ha presidido el grupo, recuerda el ambiente tenso de las primeras reuniones: «Me sentía a veces como el domador en la jaula de los leones». Sus cualidades de moderador están, ciertamente, fuera de lo común, ya que el informe, publicado en el mes de agosto pasado, después de un año de trabajo, fue aprobado, ¡por unanimidad! Uno se sorprende, por ejemplo, de que los homeópatas hayan aceptado ratificar la siguiente constatación: «De la experiencia pasada debe concluirse que las pruebas actuales son insuficientes para afirmar que la homeopatía tiene una eficacia clínica». Uno se asombra también de que los farmacólogos hayan aprobado la continuación de la frase: «... pero no que la homeopatía se sitúe fuera de toda investigación».

Para el grupo de expertos, «es difícil evaluar la eficacia clínica de la homeopatía, pues es una aproximación terapeútica con muchos componentes. [...] Sin embargo, esto no impide de ningún modo su evaluación. Se trata, a lo sumo, de una constricción. La eficacia clínica de otros tratamientos no farmacológicos de múltiples componentes, como la cirugía, ha sido bien establecida gracias a ensayos clínicos bien concebidos». El debate científico acerca de los mecanismos de acción del modelo terapéutico que avala la homeopatía (medicamento, pero también medicina y modo de prescripción) debe esperar, siendo prioritaria su evaluación clínica: «Es mucho más fácil de realizar y tiene importantes consecuencias». El conjunto de la literatura ha sido pasado por el fino peine de la metodología: De ahí la necesidad de redactar un conjunto de recomendaciones: El grupo ha llenado, asimismo, un vacío al elaborar un diccionario de referencia, cuyas 600 entradas han sido validadas por un grupo de homeópatas europeos. Con este consenso sin precedentes, ¿cómo organizar el futuro? Georges Fülgraff remarca que, «no habiendo gastado más que un poco más de la mitad del presupuesto asignando, hemos devuelto una suma de dinero no desdeñable a la Comisión». Sugiere que esta suma se utilice para financiar, durante cinco años, un grupo europeo de audiencia y consejo al que todos los practicantes estarían invitados a enviar sus proyectos de protocolos. El plazo parece razonable para que, para algunas patologías al menos, se tengan, al fin, las ideas claras sobre la eficacia de la homeopatía. Esperamos que la Comisión sabrá no interrumpir la dinámica que se ha iniciado.

G.C. ■

## Biblioteca virtual

La Universitat Oberta de Catalunya (UOC) ha puesto en funcionamiento su biblioteca virtual, que ofrece a los estudiantes todos los servicios bibliotecarios desde casa. La Biblioteca de la UOC es una de las primeras de Europa con un catálogo que combina referencias bibliográficas y textos completos, en soporte papel, electrónico y multimedia. Asimismo, es una de las primeras que permite la conexión por medio de una interfaz Web.

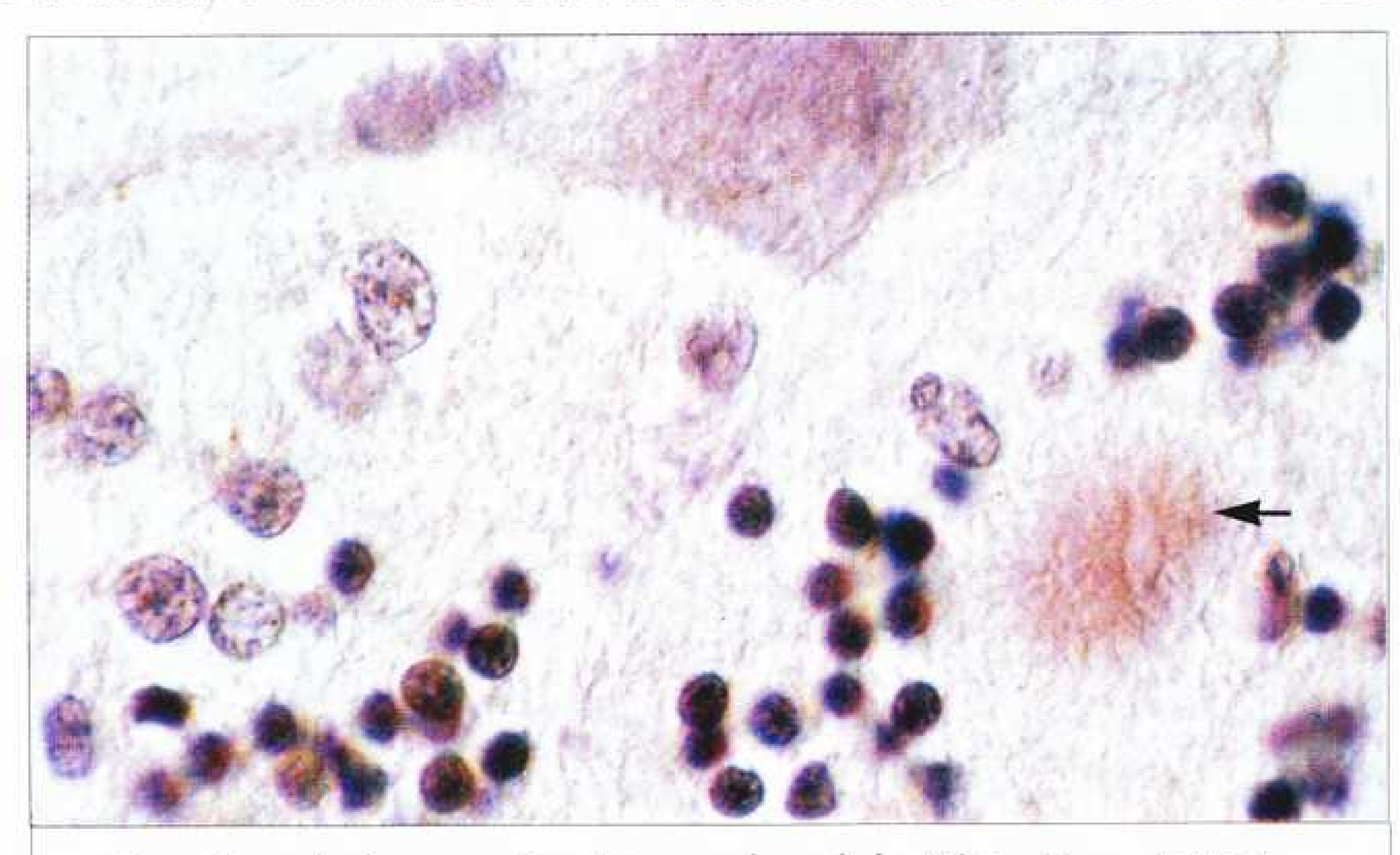



**Para más información**
Universitat Oberta de Catalunya
Avda. Tibidabo 39/43.
08035 Barcelona.

# CREUTZFELDT-JACOB, PRIMERAS PRUEBAS DIAGNÓSTICAS

***Un marcador detectable por punción lumbar permite, en personas dementes, distinguir dicha afección de otras enfermedades como el Alzheimer. Un pequeño paso a la espera de una prueba diagnóstica precoz.***

Si existe un punto de consenso alrededor de las encefalopatías espongiformes de transmisión, éste es, sin duda, la necesidad urgente de pruebas para identificar la enfermedad antes de que ésta no mate a la víctima. Aún mejor, antes de la aparición de los primeros síntomas neurológicos. Por el momento, tanto en el hombre como en el ganado bovino, sólo la autopsia permite confirmar el diagnóstico. De ahí la importancia que han adquirido los últimos resultados obtenidos por el equipo de Michael Harrington, del National Institutes of Health en Bethesda. Patentes en mano, muestran que una proteína presente en el líquido cefalorraquídeo de los enfermos, la proteína 14-3-3, constituye un buen marcador para el diagnóstico de la enfermedad de las personas dementes (G. Hish *et al.*, *N. Engl. J. Med.*, 335, 924, 1996; K.H. Lee y M.G. Harrington, *Lancet*, 348, 887, 1996). Mediante punción lumbar, este marcador permite distinguir la afección de otras demencias, por ejemplo la enfermedad de Alzheimer o sus secuelas de infartos repetitivos. Incluso si es positiva en el caso de las encefalopatías virales y de infarto cerebral en curso, la prueba es para los otros pacientes de una sensibilidad y de una selectividad excelentes (98 % y 99 %). Puede resultar sorprendente, pero el marcador había sido ya identificado por el mismo grupo en 1986, bajo el nombre de «p 130/131». En esa época, la prueba diagnóstica era inutilizable en la práctica corriente. No era, quizás, una prioridad. Ahora, al determinar la secuencia de la proteína, los investigadores han puesto a punto una prueba de detección simple. El marcador es una proteína cerebral; su acumulación en el líquido meníngeo atestigua, probablemente, una destrucción masiva de neuronas. Mientras que la prueba puede llegar a ser útil como ayuda para el diagnóstico en el hombre, queda por probar su interés en el caso del seguimiento de una epidemia animal. Los investigadores norteamericanos la han experimentado sobre numerosas especies, con resultados preliminares alentadores. Aunque no se ve demasiado claro la punción lumbar en serie en manadas de bóvidos. Sobre todo, el marcador no parece que permita identificar precozmente la enfermedad. Es la obtención de una prueba para descubrir la enfermedad antes de los síntomas lo que mobiliza a los investigadores. Teniendo a los priones mismos como candidatos evidentes. Mientras se aguarda, otra pista: la prueba urinaria y sanguínea, sobre la cual trabajan Denis Barritault y sus colaboradores, de la Universidad Paris XII. Este grupo dispone de un marcador, para el que falta su caracterización molecular. ¿Pronto una prueba diagnóstica? Con la prudencia requerida, los investigadores se contentan con indicar que sus resultados son preliminares y que no han recibido aún los fondos necesarios para el desarrollo de esta prueba.



*Una placa de degeneración típica en el cerebelo. (Foto: Hauw/CNRI.)*

# NUEVO BANCO DE PRUEBAS

*Un nuevo banco de pruebas permite verificar la resistencia a los choques de los vehículos ferroviarios.*

Los constructores de automóviles disponen desde hace tiempo de instalaciones para estudiar las colisiones automovilísticas. Para los vehículos ferroviarios los *crash-tests* no se habían realizado hasta el presente más que a escala natural y sobre líneas comerciales: operaciones delicadas y muy costosas.
El trabajo de los ingenieros ferroviarios ha sido facilitado por el banco de ensayos recientemente puesto en marcha por el Laboratorio de Automática y Mecánica Industriales y Humanas de la Universidad de Valenciennes y cuyo coste de 8,2 millones de francos ha sido sufragado por la Unión Europea, el gobierno francés y diversas empresas como GEC-Alsthom.

La pista de 55 m de longitud está equipada con raíles a una escala 1/4 y 1/2.
Los prototipos de dos toneladas de peso son arrastrados mediante un cable de 130 m, movido por un motor eléctrico de 170 kW de potencia.

La maqueta se suelta a tres o cuatro metros de un muro de hormigón armado capaz de resistir a un choque de 170 toneladas. El aplastamiento del objeto, filmado por cámaras de vídeo hasta 12.000 imágenes por segundo, se analiza mediante un detector de esfuerzos situado en el muro. El dispositivo de 50 cm de diámetro encaja el choque de manera elástica y transforma su deformación en señales eléctricas. Un haz láser completa la información: cuando alcanza al objeto que avanza hacia él, el rayo incidente es devuelto hacia la lente óptica y se mide su ángulo de incidencia.
La misma maqueta está equipada con acelerómetros que miden las aceleraciones y desaceleraciones en las tres direcciones del espacio.
Cada milisegundo todas estas informaciones son dirigidas a un dispositivo de adquisición de datos de donde son transmitidas a un ordenador para su tratamiento. ■






*Menos frecuentes que los accidentes automovilísticos, los accidentes ferroviarios impactan mucho a la opinión pública. A la izquierda, el banco de pruebas de la Universidad de Valenciennes. (Fotografías: superior, Gamma; izquierda, F. Lebrun.)*



# Órganos artificiales: prudencia

**Daniel Loisance, cirujano del corazón del Hospital Henri** Mondor de Créteil, es uno de los animadores de la Sociedad Europea de Órganos Artificiales que acaba de reunirse en Varsovia.

*Los adelantos en órganos artificiales, ¿comportan riesgos?*

La gran demanda de la población se basa en una confianza, tal vez excesiva, en los biomateriales. La prudencia no está de más. Por ejemplo, se tratan las arrugas mediante inyecciones de colágeno, siendo de temer el desarrollo de una reacción inmunológica. Se implanta un ligamento artificial en un deportista de 20 años con el riesgo de suscitar una artrosis a los 40 años.

*¿A qué han conducido los progresos recientes?*

Se ha comprendido que las características físicas (peso, molestia) de los órganos artificiales son marginales. El problema esencial es la reacción inmunológica que inducen. Los estudios no se reducen solamente al nivel celular, sino que alcanzan también al nivel molecular con el fin de reconocer a los receptores implicados. Se estudian también las posibilidades de carácter genético para mejorar la aceptación de los implantes.

*¿Qué materiales son los más apropiados?*

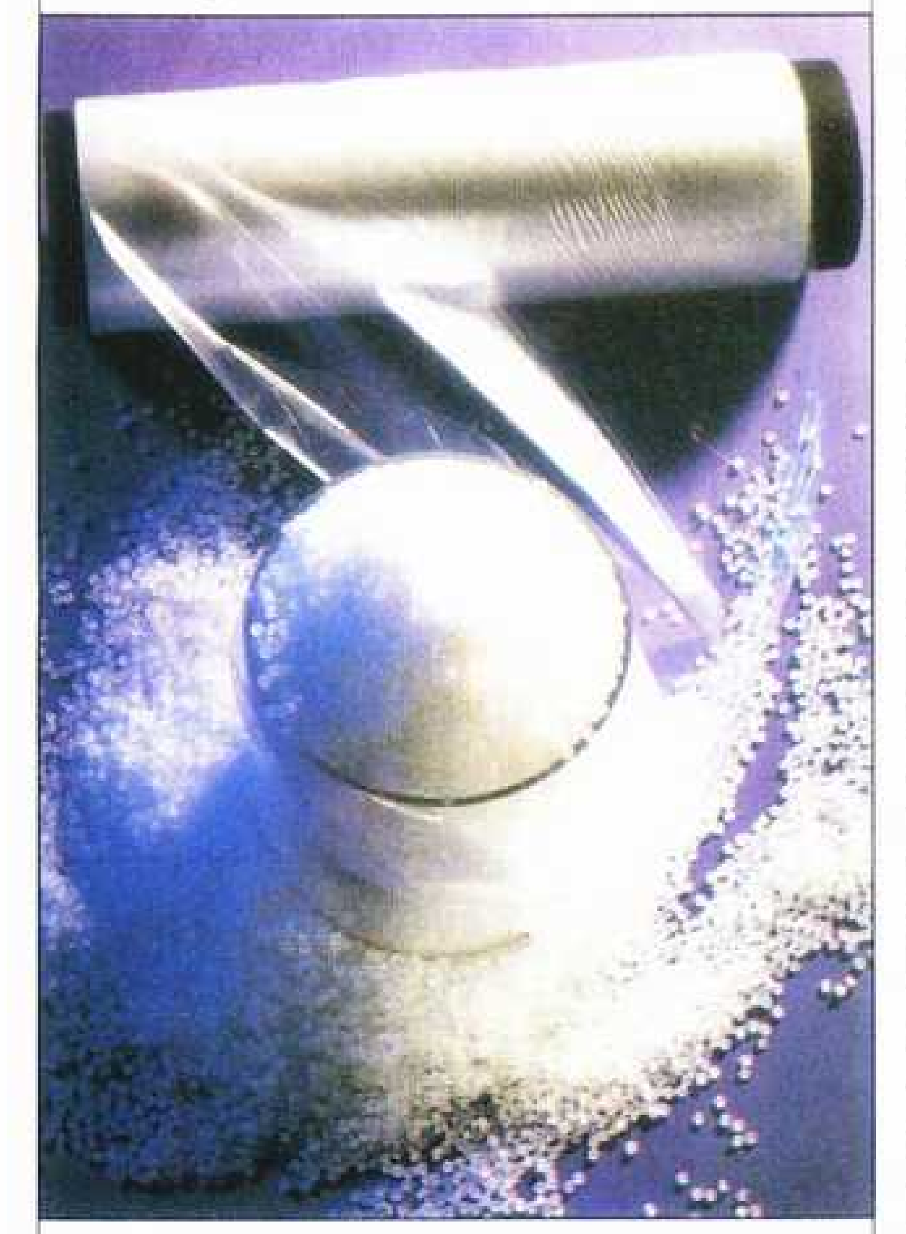
Las cerámicas parecen ser mejor aceptadas que los plásticos. Éstos tienen la ventaja de su flexibilidad. Se utiliza también el carbono sobre fibras de poliéster. El interés por un biomaterial u otro es variable. Las modas se corresponden con ciclos de investigación. Hoy la moda son los materiales biodegradables, aunque los efectos secundarios de su degradación no son bien conocidos. ■

# «VoiceType» os escucha

**El reconocimiento de la palabra humana por los ordenadores progresa** de una forma lenta pero segura. Un compromiso entre prestaciones, coste y confort caracteriza a la nueva versión 3.0 del *VoiceType* de IBM. ¿A qué tipo de usuarios se dirige? Típicamente, un radiólogo comentando una placa. Con una prosa sin florituras, para un cliente que consiente un pequeño esfuerzo a costa de un confort real, su informe se imprime al mismo tiempo que se dicta al ordenador.
El programa comprende un léxico de 35.000 palabras, cuyo reconocimiento no requiere un aprendizaje previo, y puede aumentarse con nuevas palabras.
De setenta a cien palabras son reconocidas por minuto en un ordenador Pentium a 90 MHz y 16 Mb con tarjeta de sonido.
El reconocimiento no alcanza, sin embargo, al lenguaje corriente: es necesario hablar con «palabras aisladas» efectuando una pausa después de cada una.
Las palabras «encadenadas» vendrán después —IBM dispone ya de un producto reservado a los radiólogos anglosajones—.
*VoiceType* 3.0 se adapta a diferentes jergas, gracias a «modelos de lenguaje» especializados. IBM lo orienta hacia radiólogos y cardiólogos, mientras que la versión de base se ocupa del correo comercial de juristas. ■

# Un plástico dopado con metaloceno

Las bolsas de plástico más sólidas, los embalajes alimentarios más resistentes son dos ejemplos de aplicación de un nuevo tipo de plástico: el *politileno de baja densidad lineal de metaloceno* (PEbdlm). De aquí a diez años, según la firma norteamericana EXXon Chemical, sus caulidades podrían situarlo en el grupo de los plásticos más extendidos, como el PVC o poliestireno. La novedad de este nuevo material se debe a que utiliza a escala industrial un catalizador de la familia de los metalocenos, moléculas formadas por una o dos moléculas carbondas en combinación con un átomo metálico, como el circonio. Un material plástico, o polímero, está constituido por moléculas, los monómeros, ensambladas en cadenas más o menos largas y más o menos ramificadas. Este agregado se obtiene bien por alta presión, bien por vía catalítica. Ésta recurre a un catalizador, que es un sustancia que favorece las reacciones químicas. En el proceso puesto a punto por Exxon, este papel es desempeñado por los metalocenos, cuya forma particular permite a los monómeros encajarse de forma precisa. Los químicos pueden controlar así la reacción de polimerización con una precisión sin par: las longitudes de las cadenas obtenidas y sus ramificaciones son mucho más homogéneas, lo que confiere al plástico sus propiedades de resistencia y de transparencia. Exxon comercializa los plásticos PEbdlm en Estados Unidos desde hace un año, bajo el nombre de Exceed, y los introducirá en Europa en 1997; se fabricarán en Francia en la fábrica de Notre-Dame de Gravenchon (Seine-Maritime). ■



*La utilización de un catalizador metalocénico proporcionará películas plásticas más sólidas. (Fotografía Exoon.)*

# Teléfono internacional económico

**Para reducir los costes de las telecomunicaciones las empresas recurren a** menudo al retorno de llamada (*callback*), que juega con la diferentes tarifas de los operadores de telecomunicaciones para proponer comunicaciones internacionales más baratas: se marca el número deseado, después un código y se es vuelto a llamar enseguida por la compañía que proporciona el servicio. Inconveniente: el procedimiento es un poco pesado. EL Global Access Dialer, un dispositivo puesto a punto por Telegroup, viene a simplificarlo notablemente.

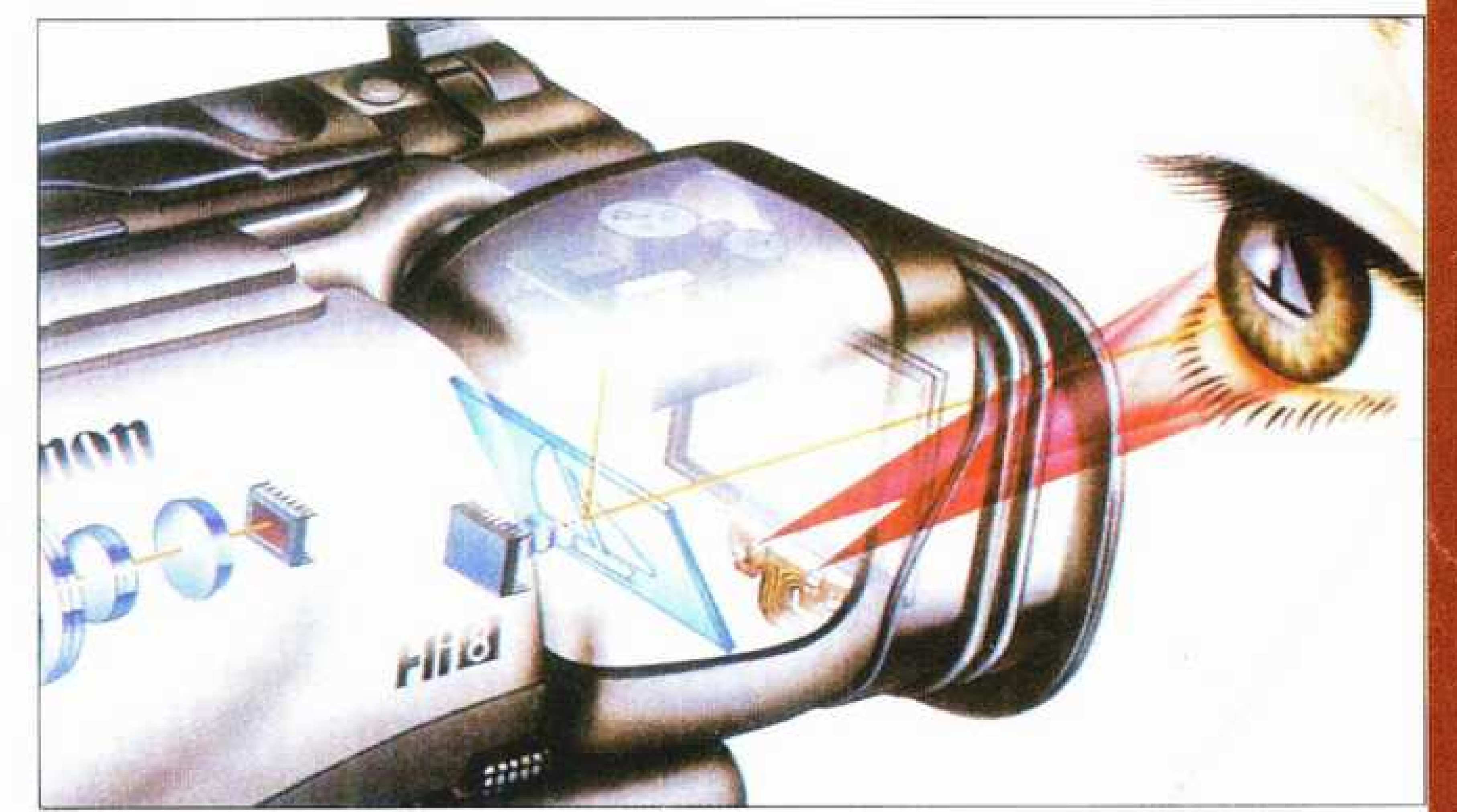
El aparato se intercala entre el teléfono y la toma.

El usuario compone simplemente el número extranjero que desea.

El dispositivo identifica la llamada internacional por el 19, marca el indicativo del país deseado y ejecuta él mismo el procedimiento de retorno de llamada, permitiendo obtener la comunicación sin tener que colgar ni tener que componer el código. ■

## CÁMARA COMANDADA POR EL OJO

**Una cierta lógica lleva al comandamiento de dispositivos por los movimientos del ojo a encontrar su primera aplicación operacional en la fotografía. Canon acaba así de lanzar la cámara UC-X30H con guiaje visual. El primer aparato que funciona según este principio, la cámara fotográfica EOS 5, había sido comercializado en 1992. Cuando el usuario mira por el visor, dos diodos envían una luz infrarroja (de longitud de onda de 880 nm) hacia el ojo. La luz es reflejada en la córnea, reenviando a través de un espejo la imagen del ojo hacia un receptor electrónico de tipo CCD (de hecho, un nuevo microprocesador llamado BASIS). Éste detecta la posición del centro de la pupila, calcula el ángulo de rotación del ojo y deduce el punto visionado por el fotógrafo. El comando autofoco se pone, de esta manera, en marcha, es decir, que la puesta a punto se realiza justo en el lugar observado. Otras funciones pueden ser accionadas, tales como el comprobador de profundidad de campo, cuando la mirada recae sobre un pequeño cuadrado situado en la parte superior izquierda del visor. La intensidad de la luz emitida sobre la pupila es de alrededor 0,3 W, inferior a la intensidad de la luz solar recibida habitualmente y, por tanto, sin riesgos. Los profesionales juzgan este comando un poco lento, aunque el procedimiento parece satisfacer a los aficionados.** ■



*El movimiento del ojo controla ciertos mecanismos de la cámara. (Fotografía Canon/USA.)*

## BREVEMENTE

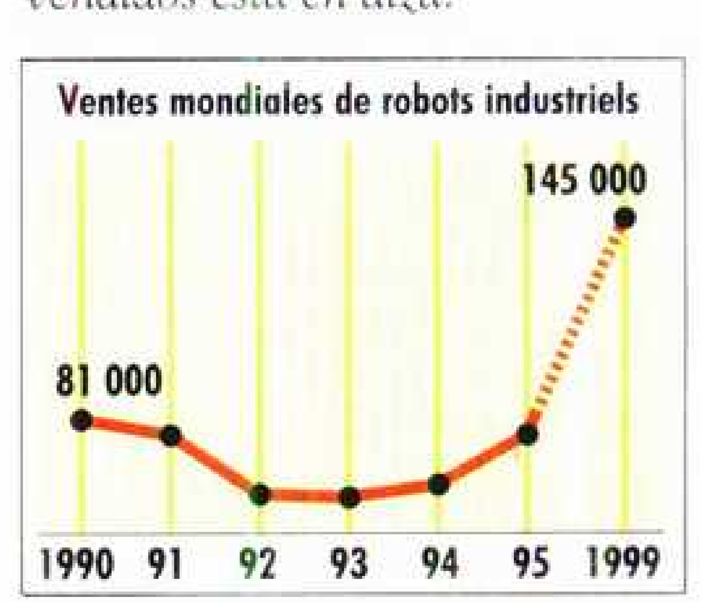
***La radiación cósmica***

*Las partículas que llegan a la Tierra desde el cosmos poseen un nivel de energía tal que pueden llegar a dañar el DNA de las células expuestas. Este peligro amenaza a los astronautas, a los pilotos y azafatas de los aviones y a los viajeros aéreos asiduos. Las partículas cósmicas pueden también deteriorar los componentes de los satélites y de las sondas espaciales. ¿Cómo medir estas radiaciones? Son muy diversas: protones solares, núcleos de helio o de elementos más pesados, rayos X, neutrones... Cerca de la Tierra sufren el efecto del campo magnético terrestre que desvía los flujos obligándolas a describir trayectorias particulares, de manera que las dosis recibidas varían mucho según los lugares de la superficie terrestre. Se obtiene información sobre estos flujos midiendo su efecto ionizante. El principio se basa en cuantificar la descomposición iónica de una mezcla de propano, $CO_2$ y azufre, a una presión de 33 milibares, encerrada en un contenedor de 100 $cm^3$ sometido a un campo eléctrico. Bajo el efecto de la radiación las moléculas de gas se ionizan y los electrones liberados crean una impulsión eléctrica proporcional a la intensidad de la radiación. Sólo queda amplificar la señal eléctrica e interpretarla para obtener una medida expresada en Gray (Joule/kg). El mes de noviembre, el Instituto de Protección y de Seguridad Nuclear embarca en la sonda marciana rusa un instrumental dedicado a obtener este tipo de medidas. Se trata de evaluar la dosis que recibiría un astronauta en el camino hacia Marte y de prever su radioprotección.*

## TENDENCIAS

***Vuelven los robots***

*Después de la caída en picado acontecida entre 1991 y 1994 debida a la recesión económica, el número de robots industriales vendidos está en alza.*




*(Fuente: ONU/ Federación internacional de robótica.)*

# El dinero hace la felicidad del Net

Desde ahora, a través del Net, todo se puede conseguir, porque por él corre el dinero electrónico, lo he comprobado. También en Francia, Globe Online (www.globeonline.fr) acaba de lanzar —en fase de prueba— su sistema de pago electrónico Globe ID, que empiezan a explotar sus dos docenas de asociados reunidos en una especie de galería comercial en el Web. En ella proponen sus «artículos» en medios como *Le Monde*, *Libération*, *La Tribune Desfossés*, *La Centrale des particuliers*, *La Voix du Nord*, la *Enciclopædia Universalis* y otros editores, pero también una marca de champán, una firma aseguradora y algunas empresas más heterogéneas. De momento, esto todavía va bien para jugar con las pequeñas cantidades de dinero que Globe Online y sus asociados nos dan. Pero esto permite empezar a trabajar. Y, *a priori*, esto funciona. Abrir una cuenta es un juego de niños, puesto que en el estado actual todavía no hay que dar el número de la tarjeta de crédito. A continuación hay que teclear un número de usuario (todavía un número) y un código secreto (todavía uno) para «firmar» cada compra, que puede ser microscópica sin ningún inconveniente, se nos dice.

Comprar un artículo de *La Tribune* por unas 25 pesetas es casi una formalidad, aunque hay que recordar y teclear los dichosos códigos...

Por supuesto, el «portamonedas virtual» Globe ID debe alimentarse desde una tarjeta de crédito.

En este momento, en Estados Unidos es CyberCash (www.cybercash.com) el que da que hablar. La empresa de Redwood City, California, que ya ofrece un servicio de crédito electrónico clásico a partir de una tarjeta de crédito, acaba de lanzar un gran CyberCoin, un sistema especializado en las «pequeñas transacciones» entre 25 centavos a 10 dólares. Un sistema que, desde ahora, entrará en Netscape, que lo difundirá. Pero otro operador de campo, DigiCash (San Diego) reprocha a CyberCash el empleo de nombres (Cash, Coin) que pueden hacer pensar equivocadamente que sus soluciones funcionan como el dinero líquido que, entre otras cosas, es anónimo.

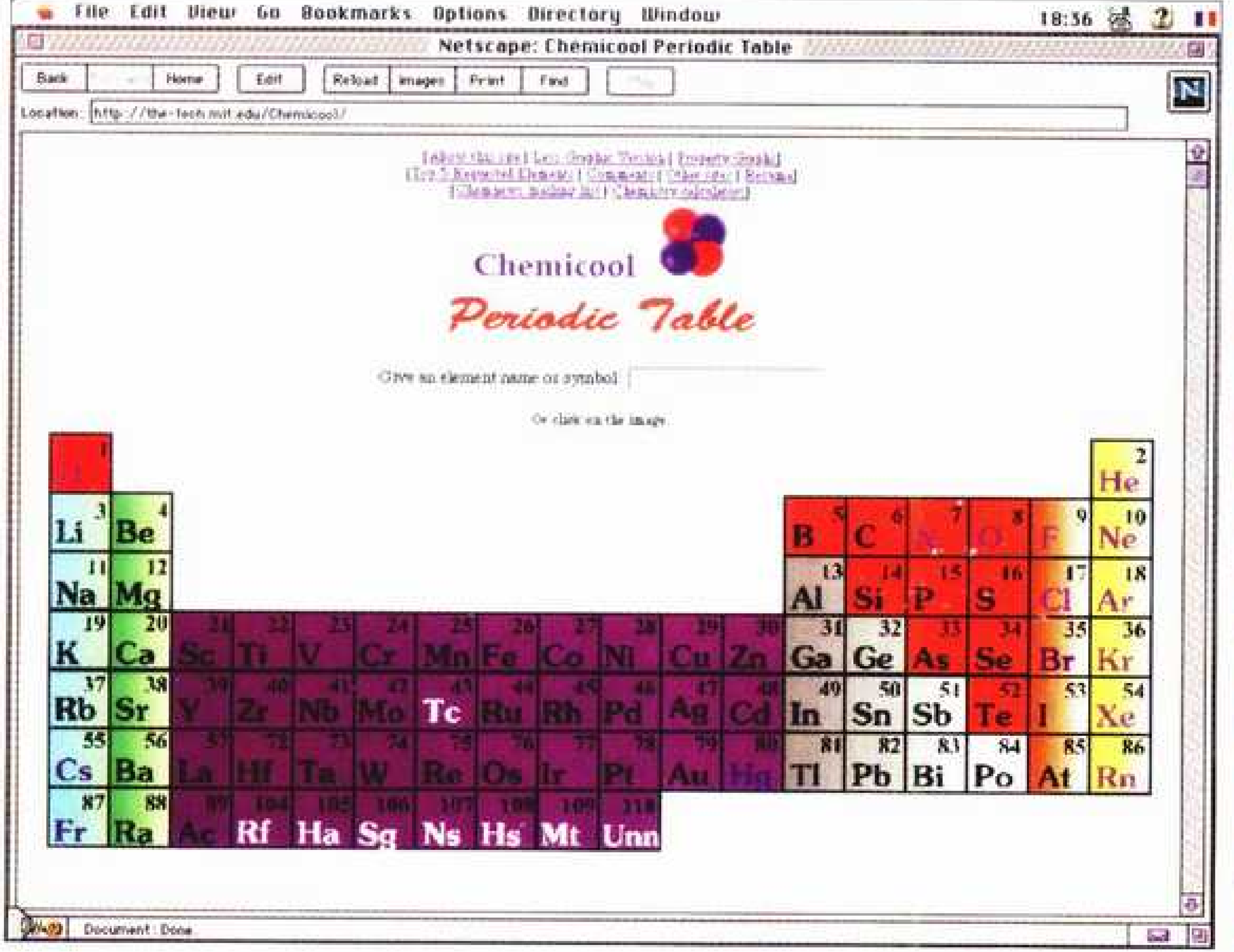
Por su parte, ECash (www.digicash.com) no dejará ninguna posibilidad al proveedor de remontarse hasta su cliente...

LO MEJOR DEL WEB

## LUGAR ELEMENTAL

**Sobrio y de buen gusto, con una interfaz perfectamente adaptada, Chemicool (the-tech.mit.edu/Chemicool) no es nada más que lo que pretende ser: una tabla periódica de los elementos (o de Mendeleiev) que puede pulsarse, realizada por un estudiante del MIT. Si probamos «F», aparecerán toda clase de indicaciones relativas al flúor. No es la biblia de este halógeno, pero es bastante más de lo que se encuentra en un diccionario. Después del número y del peso atómico, la densidad y la fecha de su descubrimiento, las temperaturas de ebullición y de fusión, presenta bastantes parámetros relativos a los niveles de energía de ionización, a la cristalización, a la reactividad frente a ciertas sustancias y a la conductividad.**

**Todo esto para el flúor, pero también para cada elemento químico. Por supuesto, estas informaciones se encuentran en numerosas «obras de papel», pero no todas están a mano. Y quedamos a la espera de la continuación...**




# Páginas Web en el correo

Una tendencia que sólo se había anunciado está tomando un poco más de cuerpo: el encuentro de los paradigmas del Web y del correo electrónico. Netscape (home.netscape.com) acaba de lanzar un caballo de batalla comercial bautizado con el nombre del IN-voxDirect que propone en varias formas de suscripciones a publicaciones electrónicas propuestas por socios, cuyos nombres figuran en el *New York Time*, el lugar ramificado Hot Wired, el célebre Yahoo, la revista informática *Pc Week* y algunas otras. Si se reciben correos periódicos en el buzón electrónico de Netscape Navigator (y esto solamente de momento), se constata que son totalmente comparables a páginas Web, con imágenes incluidas, multimedia abreviado y pulsables. Por tanto, se trata de un formidable complemento natural de la publicación clásica sobre el Web, puesto que la página recibida por correo electrónico, en forma de suplemento o de separata, puede contener un resumen que nos permite entrar con una pulsación en el artículo de interés. Naturalmente, el volumen crónico del Net y los tiempos de recuperación del correo, a veces muy largos para los usuarios conectados modestamente, no invitan a abusar de momento de esta tecnología. El primer ensayo es convincente, pero queda por ver cómo será recibido, por qué público y qué sabran hacer los editores.

MUY BREVE

## SOBRE EL WEB

### 1.000 libros a la vista

*Una iniciativa rara: en Estados Unidos, la National Academy Press (www.nap.edu) acaba de introducir no menos de 1.000 libros en el Web en texto integral y este año se dispone a añadir otros 4.000. Hay que precisar que no se trata de un editor cualquiera, sino de la National Academy of Science, del Institute of Medicine y algunos otros organismos de este género. Las obras obedecen generalmente a peticiones del Congreso.*

### Manifestaciones electrónicas

*Los ataques al Net, motivados aparentemente por consideraciones político-ideológicas, se multiplican. Éste fue recientemente el caso de un lugar de la CIA atracado y maquillado por piratas suecos. Después se ha producido un ataque en toda regla contra newsgroups frecuentados por judíos, árabes, homosexuales y feministas. Se trata de una técnica sutil: en un fin de semana, 27.000 mensajes destruidos en miles de ordenadores. Finalmente, un célebre proveedor de acceso a Internet instalado en Nueva York, Panix, fue colapsado durante un fin de semana por peticiones banales que daban una dirección de retorno inexistente. Una grieta en el edificio de Internet que se sepa, pero que siempre está ahí...*

### Cripto Clinton

*En plena campaña electoral, Clinton larga lastre sobre la exportación de herramientas de encriptación. De hecho, es una semimedida que ha propuesto a la industria, que todavía está en los estertores de muerte. Primer punto: las claves de los productos exportables podrán tener 56 bits en lugar de 40. Precisión: una clave de 40 bits la puede averiguar un aficionado listo en cinco horas en un PC, pero para abrir una clave de 56 bits, serían necesarios unos 40 años. Pero una agencia podría conocerla en unos 10 segundos. Segundo punto: para obtener el derecho de exportar estos productos, las empresas deberían contratar e integrar, antes de diez años, una técnica llamada de «reconstrucción de claves», que permite a los agentes del gobierno desencriptar un mensaje sin disponer de la clave.*



# LAS INCERTIDUMBRES DE LA ERA POSTAMIANTO

Sylvie Gruszow

## Los expertos opinan sobre la inocuidad de los materiales sustitutivos

**SYLVIE GRUSZOW** es periodista científica.

**A partir de los años 50, las industrias del aislamiento térmico y acústico iniciaron el desarrollo de fibras minerales artificiales para sustituir a las peligrosas fibras naturales de amianto. Cuarenta años más tarde, la nocividad del amianto se ha confirmado repetidamente; en cambio la supuesta inocuidad de los productos sustitutivos todavía es un tema controvertido.**

Las materias básicas que entran en la composición de las **FMA** son variadas: arena, basalto, fragmentos de vidrio, caliza, subproductos metalúrgicos de la fabricación del hierro, del cobre y del acero, coque. Las técnicas de fabricación van desde el estirado a través de hileras (filamentos continuos) hasta el soplado (fibras cerámicas) y la centrifugación (lanas de rocas, de vidrio y de escorias).

**APLICACIONES INDUSTRIALES** de las FMA son muy variadas y van desde los textiles industriales y los cascos de barcos hasta los productos que sirven para el aislamiento térmico y acústico (cubiertas de edificios, telones cortafuegos, complemento absorbente de falsos plafones...) y las sustancias calorífugas (calderas, hornos...).

Ésta es la historia de una pequeña empresa francesa, Blandin et Cie, especializada desde el final de la guerra mundial en la producción y la utilización de fibras minerales artificiales con fines de aislamiento acústico y térmico. «Producidas a partir de rocas volcánicas, de vidrio y de subproductos de la industria metalúrgica, estas fibras minerales sintéticas, explica Philippe Blandin, nos parecía que eran mucho menos peligrosas para los obreros que el maldito amianto.» Al principio de los años 50, Michel Philippe y Henry Blandin ponían a punto y patentaban un procedimiento de fabricación de sus fibras minerales sintéticas, el procedimiento «Pyrolaine-Blandin». «Estábamos obnubilados por la salud y la seguridad del personal, continúa Michel, y éramos los únicos que proponíamos un producto base de fibras minerales sin otro aditivo que el ligante sintético. Nada de amianto, nada de asbestosis, nada de cemento ni por lo tanto de silicosis.» ¿Eran los hermanos Blandin unos industriales iluminados o estaban sencillamente dotados de una intuición general? «En aquella época, precisa Michel, la única certeza que se tenía concernía a los efectos cancerígenos del amianto. Nuestras fibras no podían ser tan tóxicas. Véalo usted mismo: no hemos tenido nunca obreros enfermos». ¿Qué hay de cierto en ello? ¿Se sabe hoy en día si estas fibras constituyen o no un riesgo para la salud humana?

Las fibras minerales artificiales (FMA*) cubren un amplio espectro de productos fibrosos inorgánicos, en total hay unas setenta variedades de fibras (lana y fibras de vidrio, lana de roca, lana de escorias, filamentos de vidrio, fibras cerámicas, microfibras...) con más de 35.000 aplicaciones industriales*. Desde un punto de vista físico químico, estas fibras presentan serias ventajas respecto a las fibras naturales de amianto (véase en el recuadro «Las fibras de amianto»). Primer aspecto: las produce el hombre: por lo tanto, en teoría, se puede controlar su diámetro y



***En 1973, el aislamiento de la torre Fiat**, en París, se realizó con fibras minerales artificiales del procedimiento Blandin. (Foto Gérard Guillat.)*

su longitud iniciales (fig. 1). Segundo aspecto: debido a su estructura vítrea, sólo se pueden romper transversalmente. Una propiedad que, en principio, hace que las FMA sean mucho menos nocivas, con el paso del tiempo que las fibras natu-

rales. Finalmente, la mayor parte de las FMA, y especialmente las fibras de vidrio —que en Estados Unidos constituyen más del 80 % de la producción total— presentan una biopersistencia reducida en el medio pulmonar en comparación con la de las fibras de amianto: son eliminadas más rápidamente por el organismo.

Pese a estos aspectos positivos, algunas fibras artificiales están actualmente en el punto de mira de varios equipos científicos que consideran que su poder cancerígeno está ampliamente subestimado.[1,2,3] De hecho, prácticamente cincuenta años después de sus primeras aplicaciones industriales, la comunidad científica todavía está dividida sobre la inocuidad de estos materiales artificiales utilizados como sustitutos del amianto. Para comprender la prudencia actual de algunos investigadores y expertos en medicina del trabajo volvamos un momento a la historia de las investigaciones epidemiológicas.

En los años 80, varias publicaciones científicas presentaban de una parte los primeros estudios epidemiológicos de grupos de trabajadores de la industria de las FMA y, de otra parte, los resultados de las pruebas *in vitro* con roedores. Los estudios epidemiológicos agrupan los datos de varias factorías de producción de Estados Unidos, Canadá y Europa, en las que se ha seguido a los trabajadores durante varios decenios.[4,5,6] En conjunto, estos estudios parecen indicar una relación directa entre la exposición a las FMA y la incidencia de cánceres de pulmón, tumores y afecciones respiratorias crónicas. Incitaron a la OMS (Organización Mundial de la Salud) a clasificar en 1987 las fibras de vidrio, de roca y de lana de escorias en la categoría 2B, es decir la de los productos potencialmente cancerígenos para el hombre.

En el periodo 1990-1995, los científicos se interesaron mucho por las propiedades fisicoquímicas de las FMA (durabilidad, solubilidad, fenómenos de alteración). Se averiguó que una vez depositadas en el sistema pulmonar, la mayoría de las fibras artificiales son mucho menos resistentes en el líquido fisiológico que las fibras naturales (anfíboles). Esta disolución más rápida minimiza, en principio, las posibilidades de almacenamiento en el aparato respiratorio y por lo tanto los riesgos de cancerogénesis. Un paréntesis casi anecdótico: ¡la intuición de los hermanos Blandin resultaba tener un buen fundamento! Una única categoría de fibra parece por el contrario poseer una fuerte biopersistencia: las fibras cerámicas refractarias*.

No obstante, la diversidad de las propiedades fisicoquímicas (composiciones, diámetros, longitudes) de las FMA utilizadas en las pruebas *in vitro* e *in vivo* y que son objeto de estudios epidemiológicos hace delicada la interpretación de resultados de orígenes diversos. En 1992, la OMS definió unos criterios de estudio con objeto de poder comparar entre ellos los datos experimentales.[7] Pese a estos intentos de normalización, varios estudios *in vivo* en los que las condiciones experimentales sólo difieren muy ligeramente llegan a resultados completamente contradictorios.

Esta no linealidad de los procesos biológicos ha sido bien descrita después de dos experimentos independientes (desarrollados en Suiza y en Estados Unidos) realizados con ratas y hamsters. En el estudio suizo[8] los resultados mostraban correlaciones significativas entre la inha-

**AMIANTO BLANCO O CRISOTILO**
Serpentina de fibras tubulares como la paja. Esta categoría de amianto representa cerca del 95 % de la producción mundial.

**AMIANTO AZUL O CROCIDOLITA**
Anfíbol de fibras monocristalinas duras y rígidas como agujas.

**LAS FIBRAS CERÁMICAS**
se obtienen después de la fusión a 2.000 °C de una mezcla de alúmina y de sílice, o bien a partir de caolín, y se utilizan por sus propiedades refractarias. Representan alrededor del 2 % de la producción total de FMA.

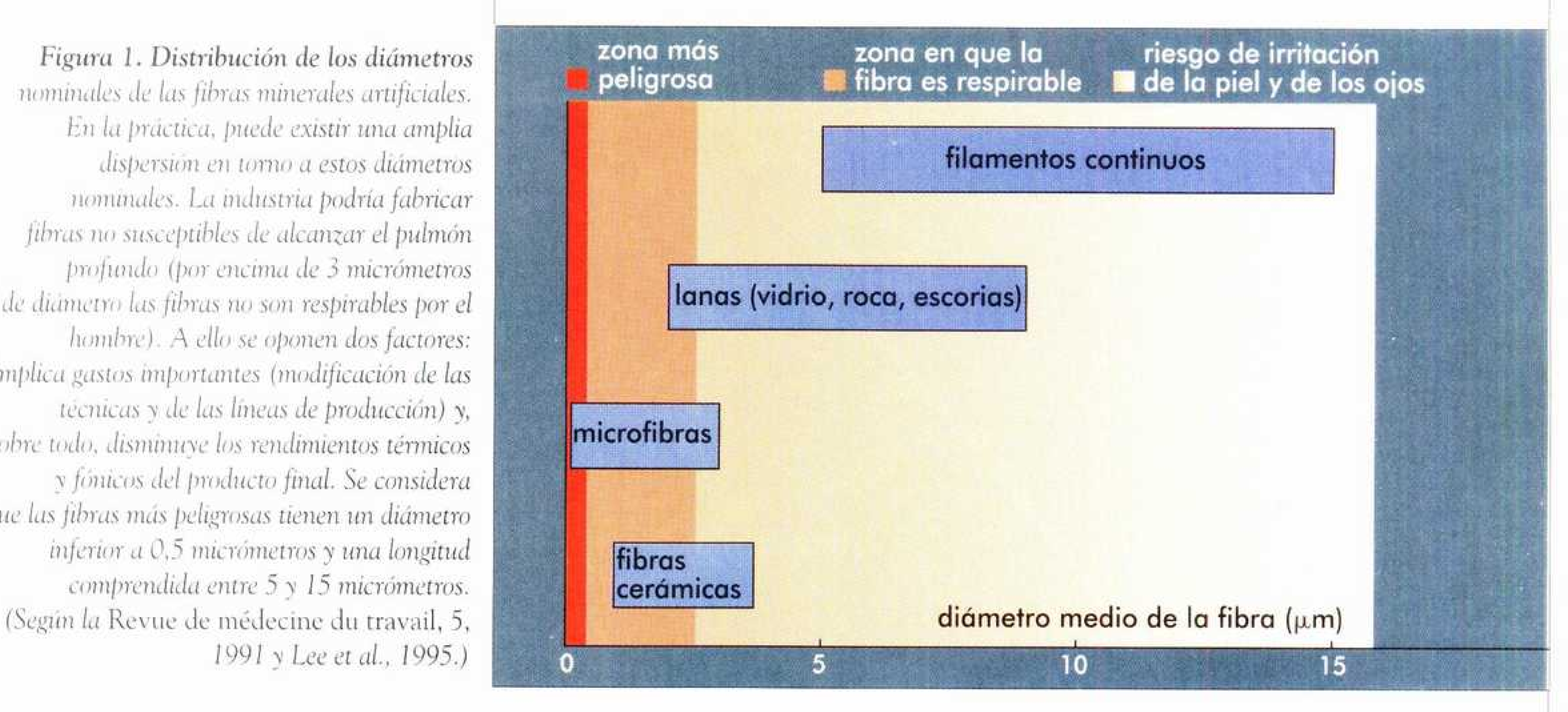



*Figura 1. Distribución de los diámetros nominales de las fibras minerales artificiales. En la práctica, puede existir una amplia dispersión en torno a estos diámetros nominales. La industria podría fabricar fibras no susceptibles de alcanzar el pulmón profundo (por encima de 3 micrómetros de diámetro las fibras no son respirables por el hombre). A ello se oponen dos factores: implica gastos importantes (modificación de las técnicas y de las líneas de producción) y, sobre todo, disminuye los rendimientos térmicos y fónicos del producto final. Se considera que las fibras más peligrosas tienen un diámetro inferior a 0,5 micrómetros y una longitud comprendida entre 5 y 15 micrómetros. (Según la* Revue de médecine du travail, *5, 1991 y Lee et al., 1995.)*

# LAS FIBRAS DE AMIANTO

Con el término genérico de «amianto» se designan varios minerales llamados «asbestiformes», silicatos cristalinos que se encuentran en estado natural en forma fibrosa. Los mineralogistas los han clasificado en dos familias principales: las serpentinas (productos de alteración de rocas ultrabásicas, dispuestos en láminas paralelas como el talco y las arcillas) y los anfíboles (silicatos hidratados con dobles cadenas de tetraedros). Estas dos familias de amianto han sido ampliamente utilizadas (en Francia hasta julio de 1994*) por la industria con las denominaciones comerciales de «crisotilo*» y «crocidolita*» en diferentes tipos de aplicaciones: revestimientos, yeso y morteros en polvo, placas para plafones y paramentos ignífugos, vestidos de protección, filtros, junturas, fundas, paneles para tejados, losas, colas y masillas, pinturas, etc.

La estructura cristalina de las fibras y sus características físico químicas determinan sus interacciones con el medio fisiológico. Después de la inhalación de una determinada cantidad de fibras de amianto, un largo y lento proceso (penetración, deposición, depuración-traslocación, biopersistencia) conduce a la acumulación parcial de estas fibras en el aparato pulmonar, la pleura, el peritoneo y los ganglios linfáticos. Según el tipo de amianto —anfíbol o serpentina— los efectos son más o menos notables.

La acumulación de las fibras es la responsable de las patologías observadas en los trabajadores del amianto y en los usuarios de los productos que lo contienen (indutria y construcción): cáncer de pulmón, placas pleurales, mesotelioma, fibrosis pulmonares... Se sabe actualmente que el diámetro y la longitud de las fibras intervienen en su nocividad: cuanto más larga es una fibra y menor es su diámetro, más peligrosa resulta. Y todas las fibras minerales naturales se pueden disgregar y fragmentar en sentido longitudinal: con el tiempo engendran subproductos cada vez más delgados y por lo tanto más tóxicos. Este «desfibramiento» parece además más marcado en el caso del crisotilo, lo que hace difícil la estimación de su vida media: ¡después de su inhalación, en vez de disminuir, el número de fibras de crisotilo muy bien puede aumentar con el tiempo!


(1)
P. Enterline *et al.*, *Br. J. Ind. Med.*, 47, 145, 1990.
(2)
P. Boffetta *et al.*, *Scand. J. Work Envir. Health*, 18, 279, 1992.
(3)
P.F. Infante *et al.*, *Am. J. Ind. Med.*, 26, 559, 1994. Este artículo ha originado hace poco un acalorado debate publicado en *Am. J. Ind. Med.*, 30, 105, 1996.
(4)
G.M. Marsh *et al.*, *J. Occup. Med.*, 32, 594, 1990.
(5)
H.S. Shannon *et al.*, *Br. J. Ind. Med.*, 47, 533, 1990.
(6)
L. Simonato *et al.*, *Ann. Occup. Hyg.*, 31, 657, 1987.
(7)
WHO, «Validity of methods for assessing the carcinogenicity of man-made fibers» *Executive summary of a WHO consultation*, 19-20 de mayo de 1992, Copenhague.
(8)
W.B. Bunn *et al.*, *J. Occup. Med.*, 35, 101, 1993.

lación de fibras cerámicas y la aparición de tumores pulmonares y de mesoteliomas en las dos categorías de roedores; en el estudio norteamericano[9] no se constataba ninguna correlación significativa. ¡Estos resultados contradictorios se han explicado *a posteriori* por la muy pequeña diferencia (< 1 %) entre los diámetros de las fibras inhaladas en los dos experimentos! Las respuestas de las pruebas también varían según el método operativo (inyección directa o inhalación).

Aparentemente, varios factores hasta ahora poco tenidos en cuenta, e incluso ignorados, tienen un efecto sobre los resultados de los experimentos. Por ejemplo, la respuesta es diferente según la especie animal y el tipo de fibra utilizada en las pruebas; así el hamster parece estar mucho más expuesto que la rata (y que el hombre) a las lesiones de la pleura, parece más sensible al poder carcinógeno de las fibras cerámicas que al de las fibras naturales (crisotilo y anfíbol) y, en cambio, sería más resistente que la rata (y que el hombre) a la inducción de tumores pulmonares. Estos diferentes resultados muestran que *a priori* la rata es el mejor modelo para estudiar los efectos patógenos de las FMA en el hombre.

Pero, ¿«equivale» un pulmón de rata a un pulmón humano? El diámetro de una fibra respirable por el roedor no es el mismo para el hombre, el tamaño de las fibras depositadas en un pulmón de rata es diferente que el de las fibras depositadas en un pulmón humano... La comprensión de los mecanismos que intervienen, extraordinariamente complejos a nivel molecular, todavía es insuficiente en la actualidad para aceptar o rechazar la extrapolación del «modelo rata» al hombre. Esta dificultad lleva a algunos científicos a considerar que los resultados de los estudios animales, principalmente los efectuados en los años 70 y 80, son en definitiva poco significativos.



*Figura 2. Revestimiento compuesto de lana de roca y de crisotilo.*
*Antes de los trabajos de demolición de edificios, el análisis por dispersión de la energía de rayos X efectuado por microscopia electrónica de barrido permite identificar y caracterizar estos revestimientos mixtos. (Según Kauffer* et al., Cahiers de notes documentaires, 150, *1993, ©* INRS.*)*

**RENDIMIENTOS TÉRMICOS** de las FMA: las lanas de roca y de escorias tienen unas elevadas resistencias térmicas (unos 820 °C), las lanas de vidrio tienen hasta 450 °C y las fibras cerámicas hasta 2.100 °C. En términos generales, la conductividad térmica disminuye con el diámetro de las fibras.

En 1994 y 1995, dos publicaciones norteamericanas[10] y una publicación belga[11] presentaron una revisión completa de los estudios *in vivo* y de los estudios epidemiológicos de los últimos treinta años. En los dos artículos de 1995, los autores revisan los resultados alarmantes de los años 80: según ellos, no permiten de ninguna forma concluir que las FMA son nocivas. Parece que en la mayoría de los estudios epidemiológicos se han ignorado varios factores, en especial la consideración de agentes tóxicos secundarios (los «factores de confusión») como el tabaquismo o la exposición acumulada a otras sustancias cancerígenas (amianto, arsénico, hidrocarburos aromáticos...) En el extremo opuesto, la síntesis norteamericana de 1994, encargada por el Departamento de Trabajo, destaca las elevadas tasas de mortalidad observadas en Canadá «unos resultados demasiado elevados para estar sesgados por factores externos como el tabaquismo»; los autores concluyen que es probable la toxicidad de las FMA y, en particular, de las fibras de vidrio «que pueden, en ciertas condiciones, ser más activas que las fibras de amianto». Por lo tanto, en 1996, están muy divididas las opiniones sobre los efectos tóxicos potenciales de las fibras artificiales, con la excepción de las fibras cerámicas refractarias que resultan incriminadas en todas las pruebas *in vivo*[12,13] y, recientemente, en dos estudios epidemiológicos, uno europeo y el otro norteamericano.[14,15]

El debate de especialistas sobre la toxicidad de las fibras minerales artificiales, que ha quedado en segundo plano detrás del debate sobre el amianto, está lejos de haber concluido. Como destaca Patrick Brochard, jefe del servicio de Medicina del Trabajo y de Consulta de Patología Profesional del Hospital Pellegrin de Burdeos, en Francia, y vicepresidente del Comité de Sanidad de Lanas Minerales (COSALM): «Los estudios epidemiológicos requieren varias decenas de años de investigación y los periodos de latencia son tales que, en el caso de las fibras cerámicas, por ejemplo, los resultados sobre las tasas de mortalidad no llegarán antes de los años 2010-2020».

**Las fibras de menos diámetro tienen los mejores rendimientos térmicos y acústicos: también son las potencialmente más nocivas**

¿Quién inventará la fibra ideal, soluble en los pulmones y resistente en el exterior del cuerpo humano? Mientras se espera este producto sustitutorio milagroso, hay que utilizar los materiales existentes. Y, algunos, se inquietan ante la evolución general de la producción que, para obtener mejores rendimientos térmicos* y acústicos, se orienta hacia fibras de un diámetro cada vez más pequeño, y por lo tanto potencialmente más nocivas.

Poco optimistas, los hermanos Blandin imaginan otro problema: «El riesgo de las FMA utilizadas en los revestimientos no es nulo, concluye Philippe Blandin; en mi opinión, no es tanto su eventual toxicidad sino más bien el mal proceder en la colocación del producto lo que hay que considerar. Si el producto está mal puesto, se tendrá una degradación rápida y concentraciones importantes de fibras en la atmósfera. Pero, desde hace años, las empresas intentan mal que bien equilibrar sus cuentas, pagan poco la mano de obra y el trabajo se hace mal. La colocación de estos productos exige reales precauciones, un perfecto dominio del trabajo. En caso contrario, se sigue abocado a la catástrofe...».

Decididamente, los expertos de la fibra —epidemiólogos, médicos, industriales y especialistas de la colocación— tienen todavía sus mejores días por delante.

S.G. ■

(9) D.M. Smith *et al.*, *Ann. Occup. Hyg.*, 31, 731, 1987.
(10) I. Min Lee *et al.*, JOEM, 37, 725, 1995.
(11) P. de Vuyst *et al.*, *Eur. Respir. J.*, 8, 2149, 1995.
(12) S. Achard Ellouk y M.C. Jaurand, *Environ. Health Perspectives*, 102, 55, 1994.
(13) R.C. Brown *et al.*, *Ann. Occup. Hyg.*, 39, 705, 1995.
(14) G. Lemasters *et al.*, *Ann. Occup. Hyg.*, 38, 745, 1994.
(15) W.N. Trethowan *et al.*, *Occup. Env. Med.*, 52, 97, 1995.
(16) «Fibres minérales artificielles et amiante», informe del GSAT, septiembre 1996.

# AMIANTO: LA EXTRAÑA EPIDEMIA NEOCALEDONIANA

Danièle Luce y Marcel Goldberg

## Una encuesta revela la nocividad de un revoque artesanal

**DANIÈLE LUCE Y MARCEL GOLDBERG** son epidemiólogos investigadores del INSERM. Marcel Goldberg ha coordinado el estudio pericial colectivo efectuado por este instituto acerca de «Los efectos sobre la salud de los principales tipos de exposición al amianto». Este estudio se ha llevado a cabo con la colaboración del Laboratorio de Estudios de las Partículas Inhaladas, así como de la Red Nacional de Salud Pública (Francia).

En Nueva Caledonia, se han constatado índices muy elevados de mesotelioma de pleura, una enfermedad provocada por el amianto. Sin embargo, este territorio de ultramar no tiene ninguna actividad industrial que pueda explicar el fenómeno. El estudio epidemiológico ha demostrado que es consecuencia de unas directivas de la Administración de los años 1930. En aquella ocasión se animó a los indígenas a sustituir sus cabañas tradicionales por casas de adobe. Para cubrir estas casas con un revoque protector, se utilizó una roca abundante en la isla y muy desmenuzable, que ha demostrado ser una variedad del amianto.

Territorio francés de ultramar, Nueva Caledonia se encuentra en el Pacífico Sur, al este de Australia. La extracción y refino del níquel, del que Nueva Caledonia es uno de los primeros productores mundiales, constituye su actividad industrial más importante. La población es un mosaico étnico que dio, en el censo de 1989, un total de 164.000 habitantes, de los cuales el 45 % son melanesios (o canacos), el 35 % europeos y el 20 % de etnias diversas (islas Wallis, Polinesia, Vietnam, etc.). El territorio está dividido en tres provincias administrativas: la provincia sur (68 % de la población) reúne alrededor de Noumea la principal actividad económica del territorio y la casi totalidad de los europeos; la provincia norte y la provincia de las islas de la Lealtad, más bien rurales, están menos pobladas, con el 21 % y el 11 % de la población respectivamente, de origen mayoritariamente melanesio.

En los años 1980, nuestro equipo de investigación efectuó en Nueva Caledonia un estudio epidemiológico sobre cáncer respiratorio relacionado con la industria del níquel. Los resultados fueron globalmente negativos, pero puso de manifiesto, y de manera inesperada, una incidencia elevada de mesotelioma de pleura.* El riesgo de mesotelioma era de dos a cinco veces más elevado en Nueva Caledonia que en la Francia metropolitana o en diversos países anglosajones.

El mesotelioma pleural es un tipo de cáncer muy raro cuya incidencia básica se estima en un caso por año y por millón de habitantes. La asociación entre inhalación de fibras de amianto y aparición de mesoteliomas ha sido establecida muy rotundamente.

En los países industrializados, las exposiciones al amianto tienen esencialmente un origen profesional. También

**PLEURA** membrana húmeda que tapiza la pared torácica y recubre los pulmones.



*La aplicación del pö (al lado). En esta imagen pueden verse las etapas de la construcción de una pared: armazón de ramas (a la derecha), adobe (a la izquierda), pö (en el centro). (Foto Collège de médecine des hôpitaux de Paris.)*

en Turquía, Grecia, Chipre y Córcega[1] se han descrito altos riesgos de mesotelioma, asociados a exposiciones ambientales de tipo geológico, debidas al afloramiento de rocas con contenido de amianto. Otra fibra mineral, la erionita, ha sido reconocida también como causante de mesoteliomas ambientales en Turquía. Aparte de la exposición a fibras minerales, no se identificó ningún otro factor de riesgo de esta enfermedad.

Las características de los casos de mesotelioma observados en Nueva Caledonia hacían prever más bien una exposición ambiental que una exposición profesional, ya que en la historia profesional de los sujetos afectados nada permitía pensar en una exposición al amianto. Se trataba de sujetos relativamente jóvenes, algunos de los cuales tenían menos de 50 años. Ahora bien, el tiempo de latencia de esta enfermedad (plazo que media entre la exposición y la aparición de los síntomas) se sitúa por término medio entre los 30 y los 40 años. Por tanto, la presencia de casos jóvenes indica una exposición que empezó en la infancia. La incidencia era aproximadamente igual en ambos sexos, a diferencia de lo que se observa en los países industrializados, donde son preponderantes los casos masculinos, dado que las exposiciones profesionales corresponden mayoritariamente a hombres. Finalmente, los casos se concentraban en zonas rurales del centro de la isla principal, y el exceso de mesoteliomas afectaba sobre todo a la etnia melanesia.

Este exceso de mesoteliomas se confirmó en los años siguientes cuando, además, se observó un aumento del número de casos anuales diagnosticado. Esto se debió probablemente a que la publicación de los resultados precedentes provocó un aumento de la vigilancia médica. Así, entre 1984 y 1993 se identificaron 28 casos de mesoteliomas, de los cuales 16 lo fueron entre 1991 y 1993. Veintitrés de los sujetos eran melanesios. El examen de la distribución de estos casos por sexo y edad reforzaba la hipótesis de la exposición ambiental: una ratio por sexo de, aproximadamente, 1 (trece hombres y quince mujeres). A tener en cuenta que el diagnóstico de baja edad dio tres mujeres de menos de 40 años. El reparto geográfico de los casos en función de su municipio de nacimiento, que era también el municipio en que habían pasado la infancia, mostraba que 22 de los casos habían nacido en la provincia norte, de los cuales 12 en un solo municipio: Houailou (3.500 habitantes). En este lugar, la incidencia es, aproximadamente, de 3 casos anuales sobre 10.000 habitantes, es decir, 300 veces la incidencia básica que puede esperarse en una población no expuesta al amianto. Con estos elementos se podía prever una exposición ambiental a fibras minerales probablemente asociada a un factor específico de la etnia melanesia.[2]

Esto hizo que se iniciara un nuevo estudio epidemiológico, a fin de identificar las causas de este exceso de mesoteliomas y, de una manera más general, los factores de riesgo del conjunto de los cánceres respiratorios (pulmón, pleura, laringe) en Nueva Caledonia. Este estudio es una investigación entre casos testigo. Su principio consiste en comparar las características de los casos, personas afectadas de cáncer respiratorio, con las de testigos indemnes a la enfermedad. Se buscaría si estos cánceres podrían relacionarse con factores ligados al modo de vida (tabaco, alcohol, alimentación), a factores profesionales (cancerígenos utilizados en la industria) y a factores ambientales. Al principio del estudio, la hipótesis ambiental se centraba principalmente en la presencia de fibras de amianto en los polvos de las vías de comunicación. En efecto, se había mencionado muchas veces la abundancia de polvo en estas vías, ya que la red de carreteras no había sido recubierta hasta tiempos relativamente recientes y todavía existían muchas pistas no asfaltadas.

*Las casas tradicionales canacas*
*están construidas con ramas y hojarasca.*
*(Foto Sibert/Cosmos.)*

Ya cuando comenzó el estudio, una de nosotras, Christine Salomon-Nékiriai, socioetnóloga con actividad de investigación en medios canacos, destacaba el hecho siguiente: en ciertas tribus de la zona con incidencia elevada de mesoteliomas, existía una práctica consistente en recubrir las paredes de las casas con un revoque blanco fabricado artesanalmente a partir de una roca desmenuzable que podía encontrarse en las cercanías de las habitaciones. Este revoque, llamado «pö» en las lenguas vernáculas (se pronuncia «pok») se describía ya en una publicación de 1953 sobre el hábitat indígena como una *especie de amianto de un blanco muy puro.*[3] Se tomaron entonces muestras del revoque y de la roca que servía para su fabricación. El análisis demostró que esencialmente en su composición entraba tremolita, una variedad de amianto del grupo de los anfíboles (véase el recuadro «Las fibras de amianto»), cuyo efecto cancerígeno en el caso del mesotelioma de pleura es especialmente potente. La utilización de este revoque se generalizó a partir de los años 1930, cuando la administración colonial propugnó, con pretextos higiénicos, la sustitución de las cabañas tradicionales canacas, hechas de ramas y follaje, por casas rectangulares de adobe. Por razones estéticas, se recubrieron con revoques generalmente blancos. En las tribus de la cadena central de la isla principal, el pö era el revoque más utilizado, ya que su preparación era fácil: la roca, muy desmenuzable, se aplastaba y se mezclaba con agua. Seguidamente, la mezcla se aplicaba a las paredes interiores y exteriores de las casas. Esta roca, que a veces aflora incluso en los poblados, era extraída por los hombres, mientras que la preparación y aplicación del revoque corría a cargo tanto de los hombres como de las mujeres, a veces incluso de los niños. Como la intemperie deterioraba la capa aplicada, regularmente se le daba otra mano, con frecuencia anualmente, hasta que, en 1950, esta frecuencia disminuyó. La práctica cayó en desuso en los años 1960 cuando las construcciones de adobe desaparecieron para ser sustituidas por otros materiales. Sin embargo, todavía quedan muchas casas recubiertas con revoque más o menos degradado, y el pö continúa utilizándose habitualmente en ciertos poblados del norte de la isla.

Con el fin de verificar que la utilización de este revoque podía provocar

(1)
J.R. Viallat, *Annals New York Acad. Sci.*, 646, 438, 1991.
(2)
P. Goldberg, *Revue d'épidémiologie et de santé publique*, 43, 444, 1995.
(3)
J. Avias, *Journal de la société des Océanistes*, 9, 129, 1953.

contaminación aérea con fibras de amianto y producir una exposición patógena, se tomaron muestras de aire en dos poblados: en uno de ellos, el revoque aún era de uso habitual; en el otro, no se utilizaba desde hacía treinta años, aunque todavía quedaban algunas casas recubiertas con pö. Las concentraciones de fibras de tremolita en el aire se midieron en el ambiente exterior, en el interior de las habitaciones durante y después de un barrido del suelo, durante la preparación y aplicación del revoque, y en los polvos de los caminos.

**Las habitaciones con revoques de tremolita en los muros de adobe no serán fáciles de descontaminar**

En las muestras de aire ambiental exterior no se detectaron fibras de amianto. Sin embargo, sí se observaron niveles muy elevados en determinadas circunstancias: 558 fibras de tremolita por litro de aire durante la preparación del revoque; 669 fibras por litro (f/l) en las nubes de polvo levantadas durante el paso de vehículos, y hasta 78.000 f/l en el interior de las habitaciones durante el barrido del suelo. Hay que tener en cuenta, no obstante, que las tomas de muestras se efectuaron en las condiciones más favorables para detectar la exposición, y representan más bien los picos de esta exposición que sus valores medios. A pesar de todo, las concentraciones eran muy altas. A título comparativo, los niveles habitualmente observados en medio urbano son inferiores a 1 f/l, y las muestras tomadas en locales con recubrimientos de amianto muestran unos niveles por debajo de las 5 f/l en la gran mayoría de los casos.

También se buscaron fibras de amianto en muestras biológicas. Su análisis permite medir la carga pulmonar de estas fibras y determinar su naturaleza. Hasta el momento, se han analizado 34 muestras. En 19 de ellas se han hallado fibras de tremolita, lo que confirma la existencia en Nueva Caledonia de una especial exposición a estas fibras. En efecto, su detección en muestras procedentes de pacientes que han vivido exclusivamente en la Francia metropolitana es excepcional.

La recogida de datos para el estudio ha terminado recientemente y ahora se está llevando a cabo su análisis. No obstante, ya se dispone de unos resultados preliminares que, por este mismo carácter, han de considerarse con prudencia mientras no sean corroborados por los análisis definitivos. Confirman que la utilización del revoque aumenta en gran medida el riesgo de mesotelioma pleural, riesgo que se multiplica por doce en las personas que han empleado el pö.

Los resultados de los análisis biometrológicos se han utilizado también para estudiar la relación entre exposición al pö y presencia de fibras de tremolita en el aparato respiratorio. Se ha encontrado este tipo de fibras en ocho de las nueve muestras tomadas en sujetos que declararon haber empleado revoque o habitado en casas con este recubrimiento.

Entre las veinticinco muestras procedentes de sujetos que no declararon exposición al pö, once resultaron negativas (sin detección de fibras) y tres revelaron la presencia de fibras de amianto distintas de la tremolita (amosita, crocidolita), probablemente debida a exposiciones profesionales. Once, sin embargo, contuvieron fibras de tremolita. Este último resultado puede indicar la existencia de otras fuentes de exposición a la tremolita, no asociadas directamente al uso del pö (polvo de los caminos, por ejemplo). El examen de los cuestionarios de estos once sujetos muestra que siete de ellos, debido a su profesión, estaban expuestos a polvos procedentes del suelo. Estos resultados demuestran que la retención de fibras de tremolita en el aparato respiratorio está fuertemente asociada a la utilización del pö, pero, por otra parte, parecen también confirmar que existen otras fuentes de exposición a la tremolita.

A pesar de que el estudio no ha terminado, actualmente, los argumentos en favor del papel causal de la exposición ambiental a la tremolita en la aparición de mesoteliomas y cáncer de pulmón en Nueva Caledonia son suficientes. Los poderes públicos y los profesionales sanitarios han sido informados para que puedan tomar medidas preventivas.

Las poblaciones afectadas también han recibido información acerca de los riesgos que entraña la utilización del revoque, y se les han hecho las recomendaciones oportunas para que supriman el uso del pö y tengan en cuenta la conducta que han de adoptar respecto a las habitaciones con este recubrimiento. La descontaminación de las habitaciones revocadas con tremolita plantea problemas difíciles, ya que las técnicas habituales de decapado no pueden utilizarse en paredes de adobe. Se han apuntado diversas soluciones que, sin embargo, han de experimentarse en situación real. Su puesta en práctica implica una identificación previa de todas las habitaciones afectadas.

**D.L. y M.G.** ■

Claire Serain y Jochen Meyer

# ¿SE HA INVENTADO LA RUEDA MOLECULAR?

## Exploración de los confines del mundo molecular

**CLAIRE SERAIN** (cserain@post.unibielefeld.de) y **JOCHEN MEYER**, Laboratorio de química inorgánica del Pr. Müller, Facultad de química, Universidad de Bielefeld, Alemania.

**¿Es posible crear moléculas de tamaño «infinito»? O, dicho de otro modo, ¿dónde acaba la molécula y comienza el sólido? La síntesis de una molécula en forma de «rueda gigante» reabre el debate.**

El círculo muy cerrado de los nanomateriales cuenta desde hace unas semanas con nuevo miembro: el $[Mo_{154}]$, conocido más simplemente como «gran rueda» debido a su forma.[1] La molécula, con un diámetro de 3 nm, una cavidad central de 2 nm y más de 700 átomos, es la mayor jamás sintetizada en química inorgánica (fig. 1).

Pese a su imponente masa molecular, de unos 24.000 g/mol (equivalente a la de una proteína), la «gran rueda» se disuelve muy bien en el agua. Y con razón: su forma le confiere una gran superficie exterior e interior, erizada de numerosos grupos $OH^-$ y $H_2O$. Por otra parte, su gran tamaño hace que la molécula $[Mo_{154}]$ forme una solución coloidal. No obstante, es posible obtener cristales* de la sustancia y por lo tanto determinar su estructura por difracción de rayos X.

El recién nacido pertenece al mundo de las moléculas mesoscópicas, cuyo tamaño es superior al de las moléculas usuales (entre 0,1 y 1 nanómetro) pero inferior al de los sólidos. Se trata de una peculiaridad que permite presagiar otras muchas propiedades inexistentes en las primeras y los segundos. De hecho, la probabilidad de aparición de propiedades inéditas está ligado no sólo al tamaño sino también a la complejidad del sistema molecular. Ahora bien, los sólidos y los polímeros, debido a su estructura periódica, son poco complejos pese a su gran tamaño. En cambio, cuanto mayor y más complejo es un compuesto, tanto más cabe esperar que sea multifuncional. La naturaleza abunda en ejemplos que cumplen este principio, como los enzimas. Su construcción a partir de una determinada sucesión de aminoácidos les confiere una estructura espacial y las excepcionales propiedades catalíticas de todos conocidas.

Precisamente para explorar las propiedades inéditas de la materia hemos acometido la creación de sistemas moleculares discretos, es decir, de tamaño espacialmente limitado pero de dimensiones y complejidad importantes. Hemos dedicado nuestra atención a los polioxometalatos, unos sistemas moleculares (llamados también *clústers*) compuestos esencialmente por átomos de oxígeno y de metal de alto grado de oxidación (vanadio, molibdeno, tungsteno).[2,3,4]

Paradójicamente, la síntesis de estos compuestos complejos, a los que pertenece el $[Mo_{154}]$, presenta la enorme ventaja de ser simple. En función del pH, se puede sintetizar un número impresionante de nuevas estructuras[5] que corresponden a los criterios de tamaño y complejidad anteriormente señalados. Un solo obstáculo: hay que evitar fabricar polímeros en los que un motivo se repite indefinidamente. Se trata de un problema recurrente en química inorgánica. El crecimiento de los sistemas grandes es difícilmente controlable y a menudo desemboca en compuestos cuya estructura es de sólido en dos o tres dimensiones.

¿Cómo se puede controlar el crecimiento de los compuestos? Utilizando fragmentos que adornan su superficie para impedir la ocurrencia de reaccio-

**Figura 1. La gran rueda:** *el mayor compuesto discreto fabricado por el hombre en química inorgánica (3 nm de diámetro). Su fórmula es* $[Mo_{154}(NO)_{14}O_{420}(OH)_{28}(H_2O)_{70}]^{(25\pm5)-}$. *La cavidad central podría utilizarse para producir reacciones catalíticas. El tamaño, la superficie interior, el número importante y variable de electrones, así como la solubilidad de este compuesto, se prestan efectivamente a tales manipulaciones.*

(1) A. Müller *et al.*, *Angew., Chem. Int. Ed., Engl.*, 34, 2.122, 1995.
(2) M.T. Pope, *Heteropoly and Isopoly Oxometalates*, Springer, Nueva York, 1983.
(3) P. Souchay, *Ions des minéraux condensés*, Masson, París, 1969.
(4) A. Müller, *J. Mol., Structure*, 325, 13, 1994.
(5) J.-P. Jolivet, *De la solution à l'oxyde*, InterEditions, CNRS éditions, París, 1994.

**LOS COMPUESTOS $[MO_{36}]$ $[Mo_{57}V_6]$ Y $[Mo_{57}FE_6]$** tienen por fórmula química: $[Mo_{36}(NO)_4O_{108}(H_2O)_{16}]^{12-}$ $[H_3Mo_{57}V_6(NO)_6O_{183}(H_2O)_{18}]^{21-}$ y $[H_3Mo_{57}Fe(NO)_6O_{177}(H_2O)_{24}]^{15-}$

*Código de colores: vanadio (azul), oxígeno (rojo), halógeno (amarillo), nitrógeno (verde).*

Las moléculas se ordenan entonces en el espacio de forma tridimensional sin que haya vínculos entre ellas. En razón de esta peculiaridad, la «gran rueda» es la mayor molécula sintetizada en química inorgánica porque existe **EN ESTADO CRISTALINO** de manera discreta. El cristal tiene una forma de paralelepípedo de color azul-negro.

Un sólido posee una estructura simétrica cuyos **MOTIVOS BÁSICOS SE REPITEN** casi indefinidamente en dos o tres dimensiones. Ejemplos típicos son los cuarzos y los metales.

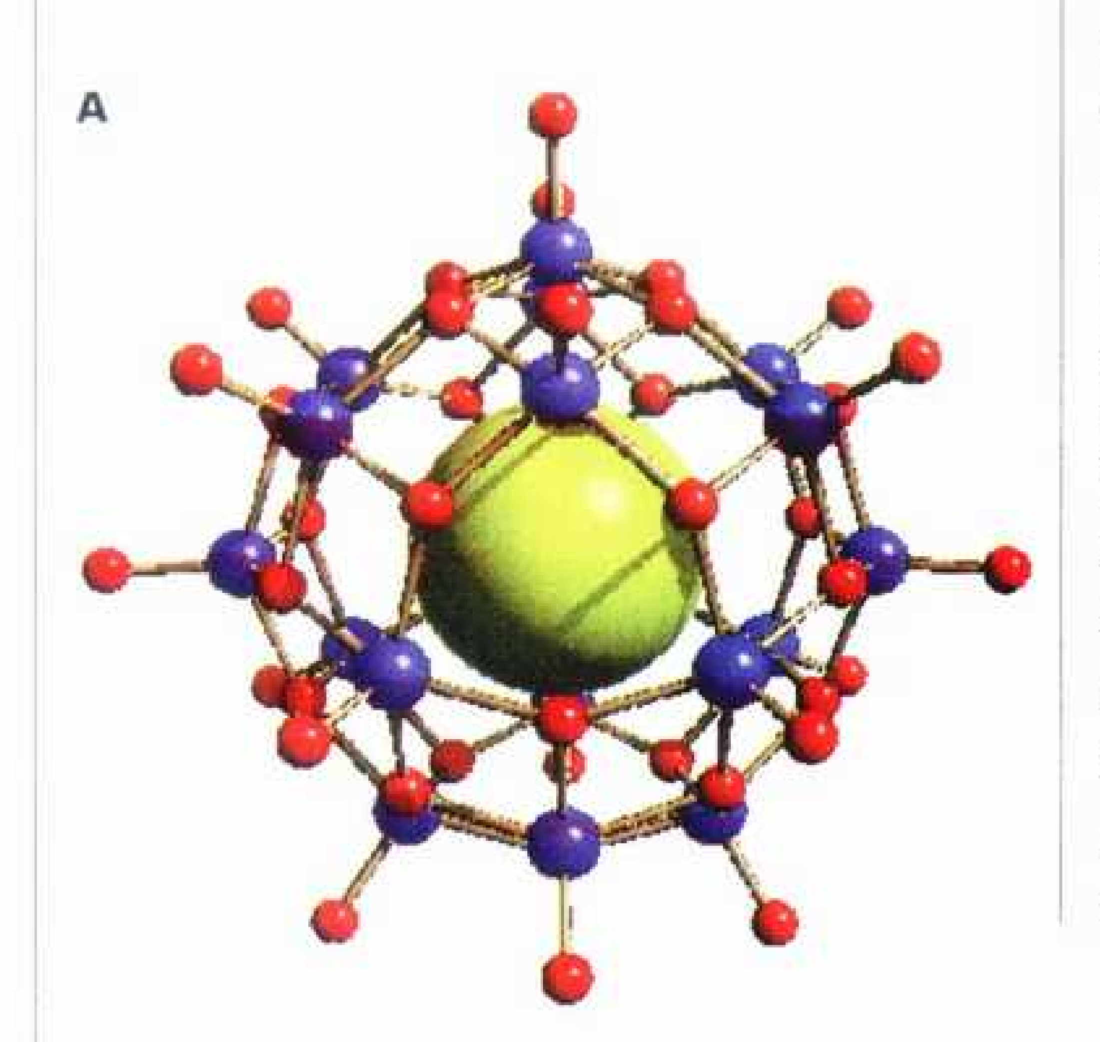
*Mundo Científico* ha publicado
**(1)** «Los cristales de fulerenos», nº 133, marzo, 1993.


**(6)** A. Müller *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 34, 2328, 1995.
**(7)** A. Müller *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 30, 1674, 1991.


nes, con lo que se preserva la estructura obtenida. En el caso de los polioxometalatos, se trata de átomos de oxígeno poco reactivos que, como si de púas de un erizo se tratase, protegen cada clúster.

No obstante, el detalle de los procesos que intervienen en el crecimiento de los clústers todavía no está bien comprendido. Cabría suponer, a la vista de nuestros resultados anteriores, que las entidades básicas se reúnen y se organizan en sistemas cada vez mayores hasta

A



estructura. Obviamente, se trata de una propiedad muy útil para el desarrollo de una electrónica molecular.

La formación de clústers polioxometalatos recurre a menudo a un fenómeno llamado «efecto templato».(6) Un templato es una especie molecular o aniónica ($Cl^-$, $N_3^-$...) cuya presencia determina el curso de la reacción y la formación del clúster en solución. Al interactuar débilmente con las unidades de base, el templato restringe su movilidad, orquesta un agrupamiento alrededor suyo y dirige la construcción del compuesto. En los casos anteriormente mencionados, se aíslan estructuras en forma de concha formadas por átomos de vanadio y de oxígeno, que recuerdan las estructuras de los fulerenos ($C_{60}$...).(1) Su forma y grosor están sorprendentemente determinados por el templato aprisionado. Así, al añadir iones halógeno ($Cl^-$, $Br^-$, $I^-$) a la solución reactiva, se forman unas envolturas esféricas; en cambio, el añadido de especies como $N_3^-$ conduce a especies alargadas(7) (fig. 2).

## Unos clústers de aspecto cambiante

B

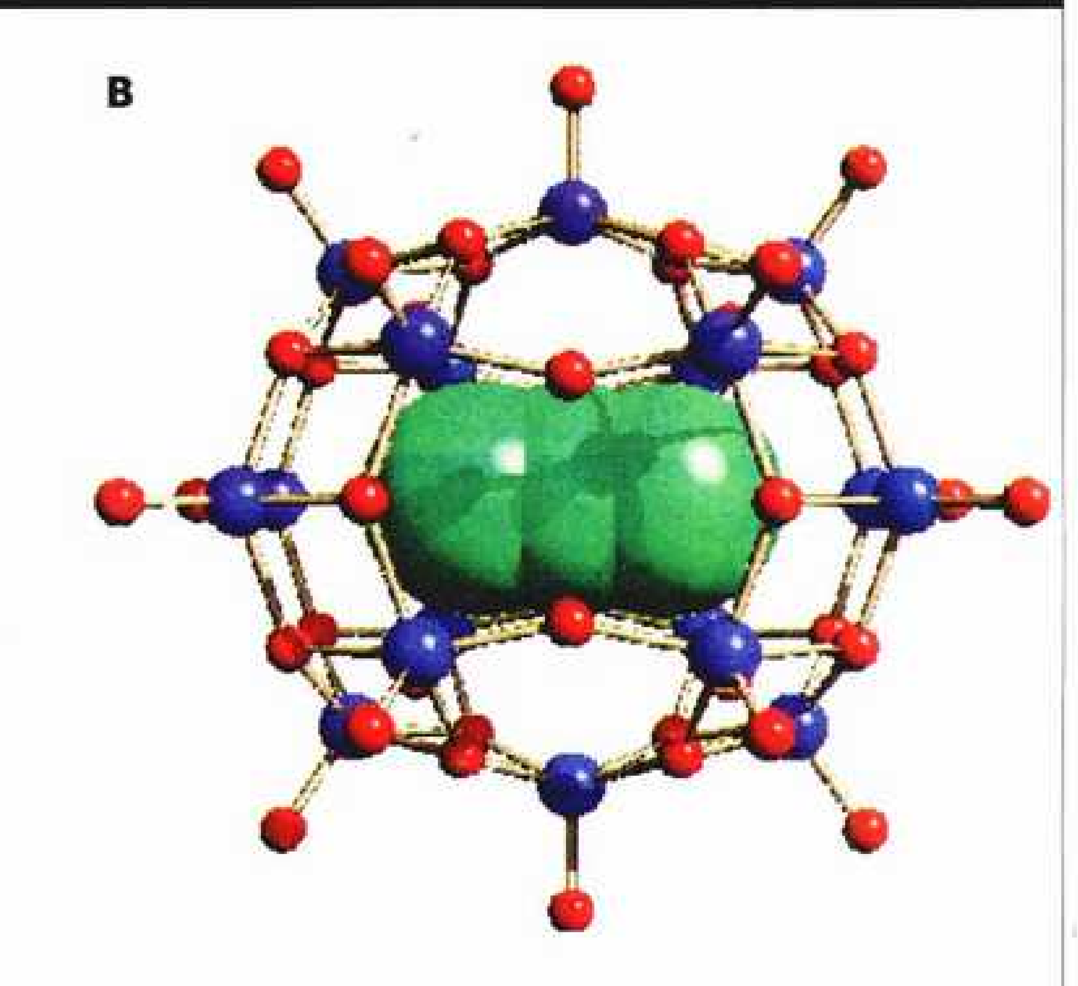


***Figura 2. Influencia del anión aprisionado*** *(templato) sobre la forma del clúster.*
*(A) Clúster esférico en el caso en que el anión aprisionado es un ion halógeno (cloruro, yoduro o bromuro).*
*(B) Clúster de envoltura alargada en el caso en que el anión aprisionado es lineal (el templato está ampliado intencionadamente para mejorar la claridad de la imagen).*

que se alcanza el tamaño final; la única condición sería un control óptimo de las cargas. En el fondo, no otra cosa hace el niño que elabora construcciones ingeniosas a partir de elementos básicos muy simples, a condición de no ponerlas en fila india. Cuando las unidades básicas tienen el tamaño de una molécula se obtienen clústers monomoleculares, como los compuestos $[Mo_{36}]$ y $[Mo_{57}V_6]$*, elaborados a partir del mismo fragmento $[Mo_{17}]$. En el primer caso, dos fragmentos de $[Mo_{17}]$ quedan unidos por dos átomos de molibdeno. En el segundo, seis átomos de vanadio y seis de molibdeno ligan tres fragmentos.

En el sistema $[Mo_{57}V_6]$*, los seis átomos de vanadio pueden intercambiarse sucesivamente con átomos de hierro durante la síntesis del compuesto hasta obtener el clúster final $[Mo_{57}Fe_6]$. Estas sustituciones modifican completamente el momento magnético sin alterar la

Se produce una inesperada coincidencia: el clúster $[Mo_{57}V_6]$ se inserta exactamente en la cavidad de $[Mo_{154}]$. Ahora bien, este último se forma durante la misma reacción de síntesis que el $[Mo_{154}V_6]$. De ahí a pensar que el compuesto, o un fragmento de él, desempeña el papel de templato, no hay más que un paso. Este proceso no conduciría a la formación de una estructura cerrada como en los ejemplos ya citados, por lo que el templato no quedaría aprisionado.

Se ve, pues, que un cambio, siquiera menor, de los parámetros de la reacción induce la formación de compuestos muy distintos. Un hecho que explica por qué el número y la variedad de los polioximetalatos carece actualmente de equivalente en química inorgánica.

C.S. y J.M.■

# CONSTRUIR EL ESQUELETO DE LAS CÉLULAS

Éric Karsenti e Isabelle Vernos

¿Cómo elaborar una forma a partir de una combinación de genes?

**ÉRIC KARSENTI** es director de investigación en el CNRS y coordinador de programa en el Laboratorio Europeo de Biología Molecular (EMBL) de Heidelberg (Alemania).
**ISABELLE VERNOS** es encargada de investigación en el EMBL.

**Cuando una célula del organismo se divide, sufre profundas modificaciones. El estudio de este proceso ha dado como resultado un nuevo modelo de autoorganización de las proteínas que podría tener un alcance mucho más general en la construcción de la forma de las células.**

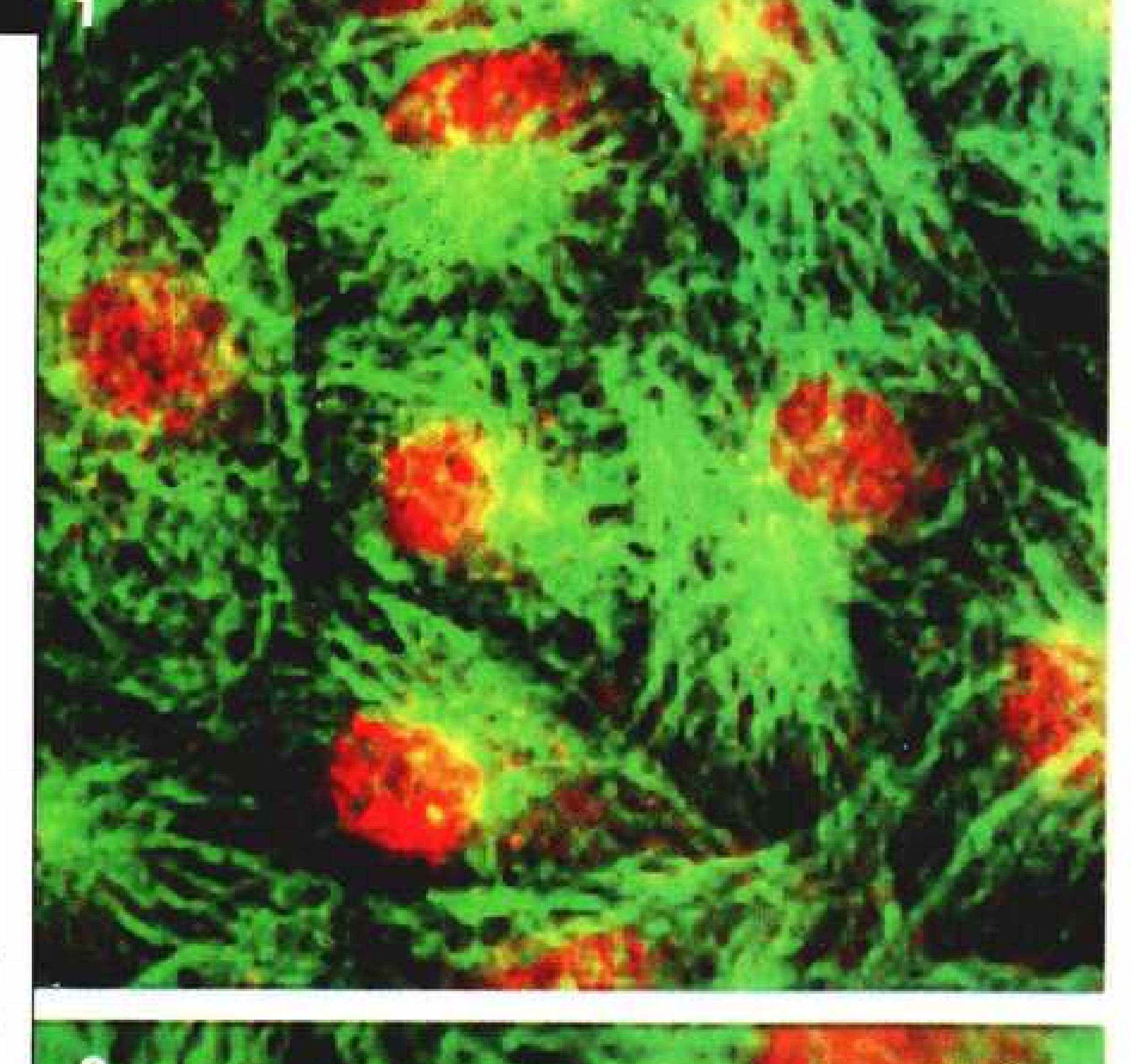
En biología, el origen de las formas plantea un problema fundamental. Durante la embriogénesis, la información almacenada en forma lineal, en los genes, se traduce en tres e incluso en cuatro dimensiones para construir un organismo. ¿De qué manera una combinación determinada de genes, decodificados en proteínas específicas, puede dar lugar al nacimiento de unas formas particulares? La primera idea que surge es la del autoensamblaje: diversas proteínas se unen para dar lugar a estructuras complejas. Lo mismo que en un juego de construcción, se encajan una serie de formas (cada una de las proteínas) para construir otra mayor y más compleja.

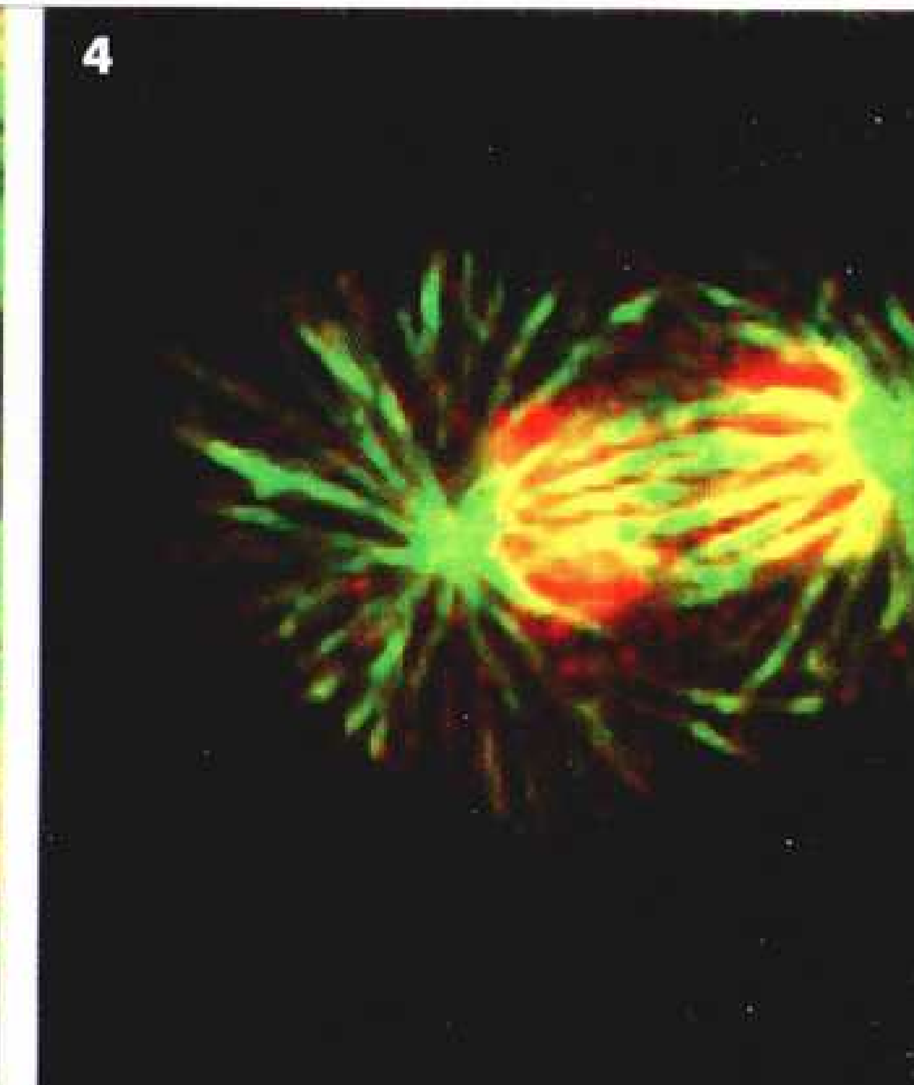
**LOS MICROTÚBULOS Y MICROFILAMENTOS** son unas fibras microscópicas (diámetro de 6 a 22 $10^{-9}$ metro) que forman parte del esqueleto de las células e intervienen en sus movimientos. Los microtúbulos, huecos, están formados por polimerización de una proteína elemental, la tubulina. Los microfilamentos, más pequeños, son polímeros de actina.

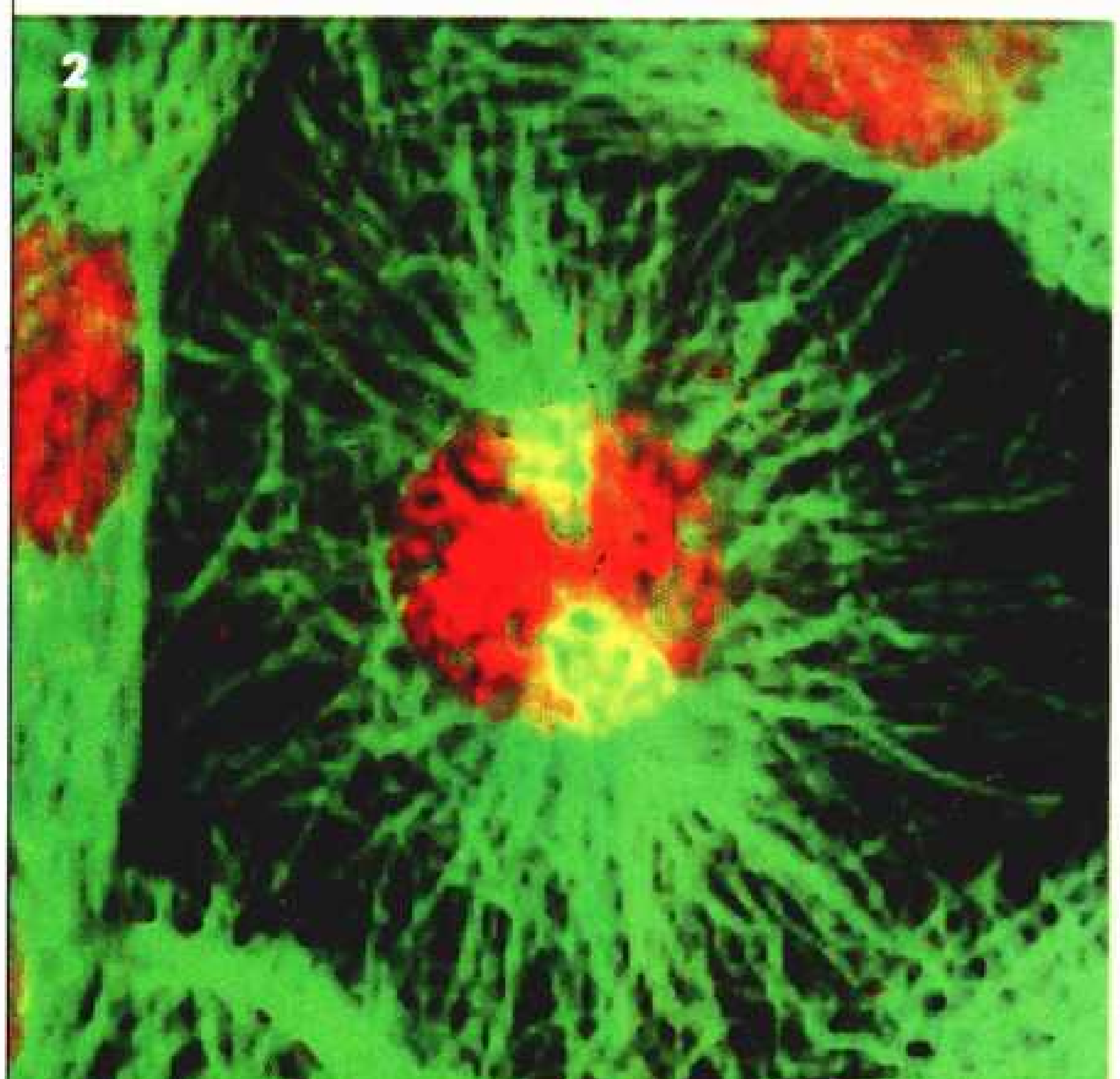
## Problema de escala: una proteína mide, en general, varias mil millonésimas de metro; una célula, una décima de milímetro

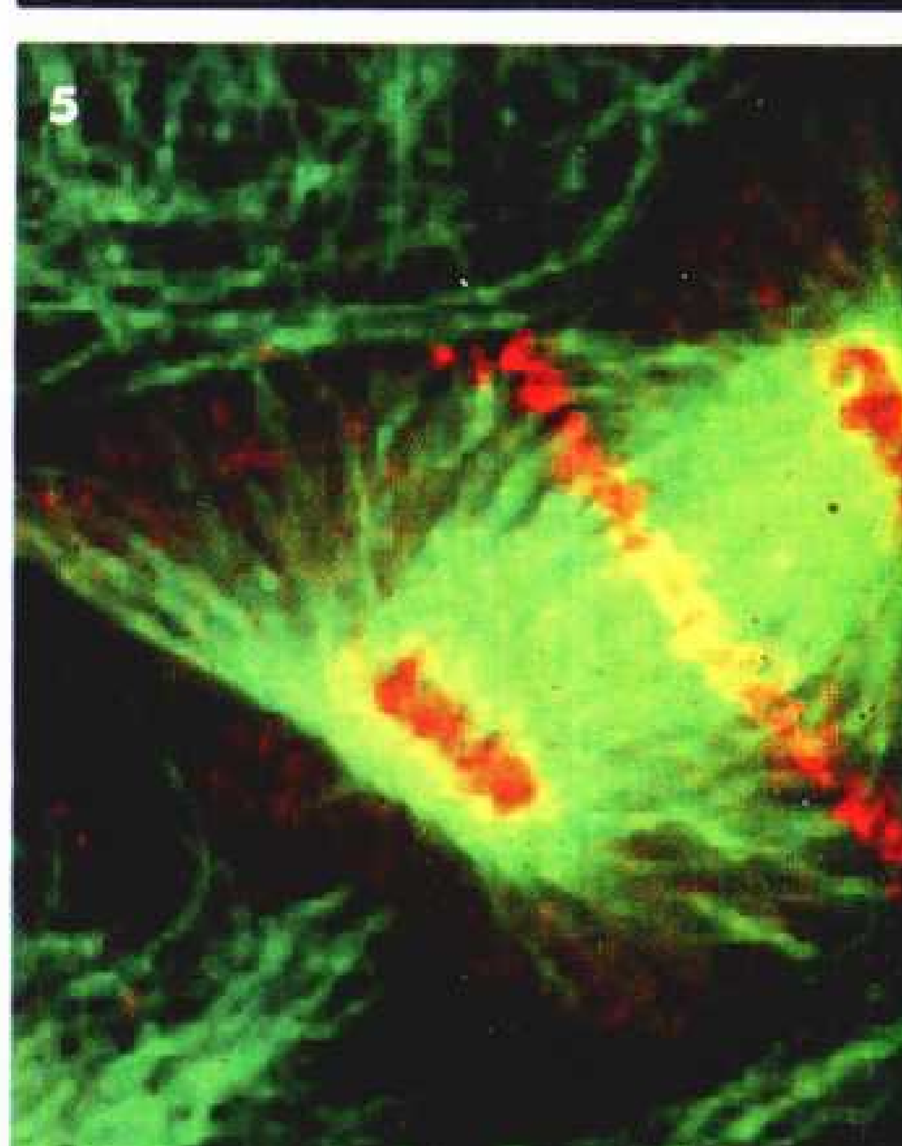
Así se forman los virus y ciertos componentes celulares. Pero es evidente que solo este principio no basta para explicar la construcción de un organismo entero, con sus células de aspectos muy diversos y sus diferentes órganos. Sin duda, el problema es más bien de escala. Una proteína de tamaño medio mide algunas mil millonésimas de metro, mientras que una célula llega a medir desde 0,1 mm hasta... ¡algunos metros en ciertas neuronas!

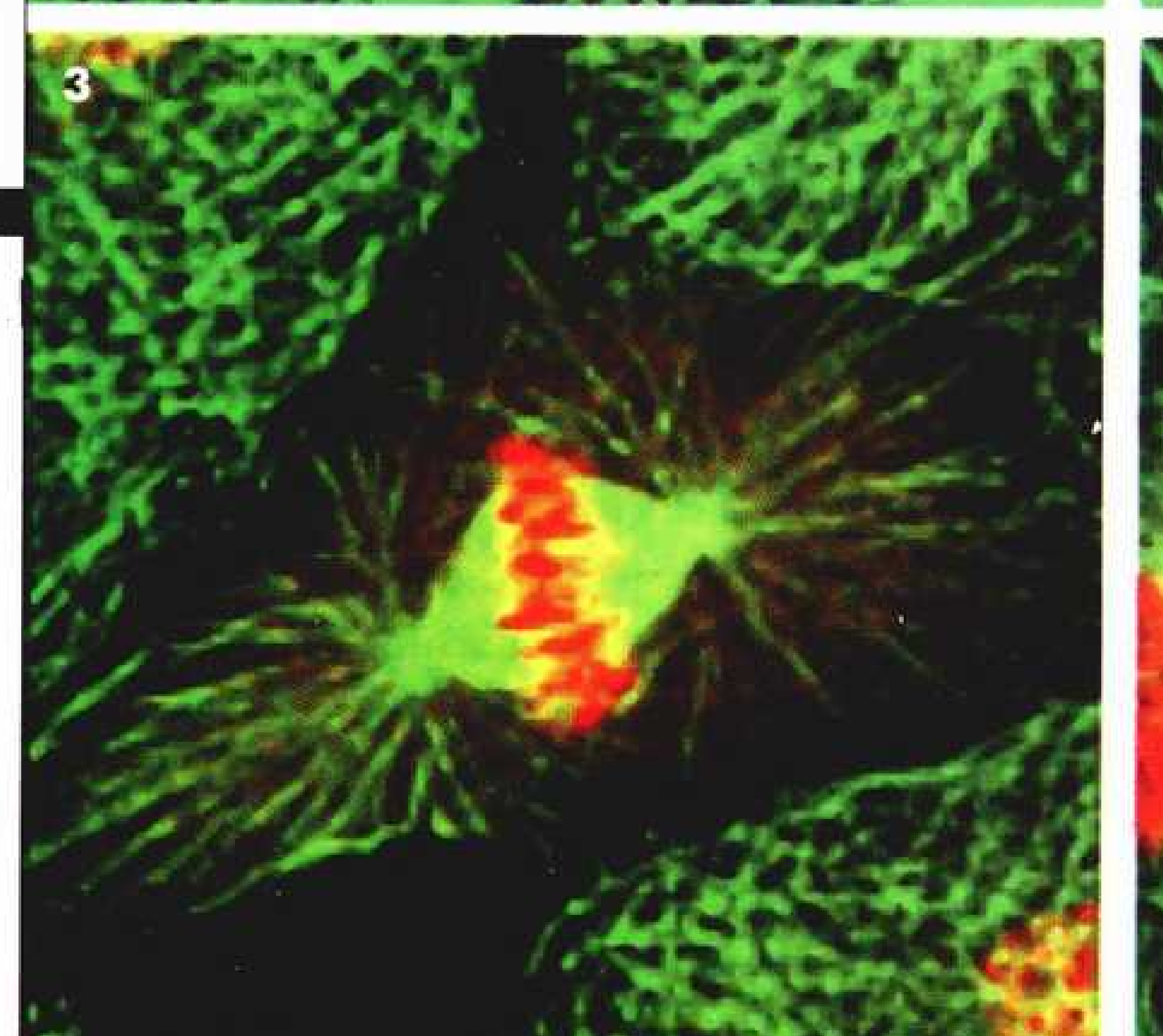
*Mundo Científico* ha publicado:
(1) «La división celular», nº 54, febrero 1995.



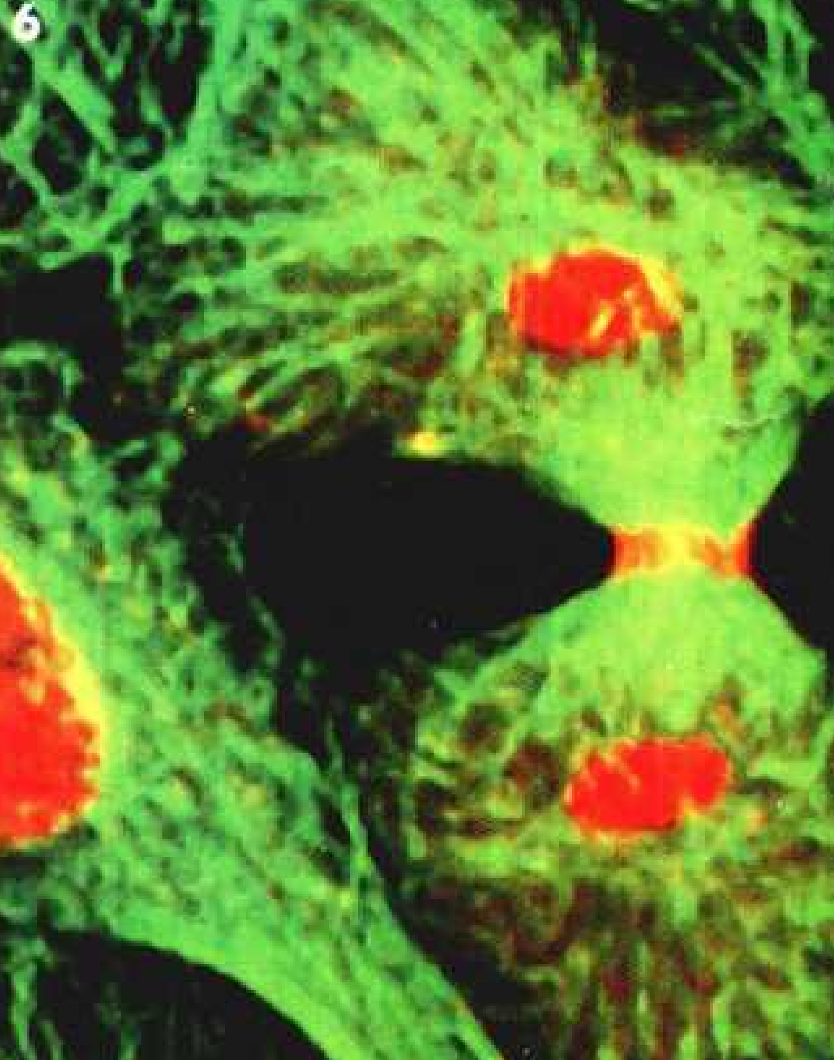




**Figura 1. Las diferentes fases de la división de una célula de rana.** *Las modificaciones del citoesqueleto (en verde, los microtúbulos) son vistas por inmunofluorescencia. En rojo, una proteína asociada a los cromosomas: la cromocinesina, un motor molecular. (Fotos autores.)*

**CINETÓCOROS**
sinónimo de
**CENTRÓMERO**
región del cromosoma que se asocia con las fibras del huso en ciertas fases de la mitosis o la meiosis.

Por otra parte, la forma y la función de las células no son siempre las mismas. De ahí la necesidad de nuevos principios de morfogénesis: hay que coordinar en el espacio y en el tiempo una serie de interacciones entre moléculas y a distancias a veces considerables.

Las células del organismo contienen un grupo de proteínas perfectamente colocadas para intervenir en la morfogénesis, ya que forman unas uniones variadas en respuesta a diversas señales. Son las proteínas del citoesqueleto, etimológicamente «esqueleto de la célula» (fig. 1). Estas proteínas tienen la particularidad de unirse en polímeros, compuestos de múltiples unidades idénticas. Forman unas largas fibras que recorren el interior de las células, como los microtúbulos y los microfilamentos.* Estas fibras poseen dos propiedades esenciales. Son dinámicas, es decir, en constante formación o destrucción, por adición o sustracción de proteínas elementales. Son también polares, es decir, orientadas, con un extremo, llamado «+», en el que se hace el ensamblaje, y un extremo «–» más inerte. Por tanto, controlando el crecimiento de estas fibras y su orientación en la célula es posible organizar el espacio celular.

Todavía no se sabe mucho acerca de la manera en que las fibras del citoesqueleto se autoorganizan para definir la forma o la polaridad de las células. Es difícil rehacer la construcción de una neurona y sus innumerables prolongaciones, la formación de las células musculares, o la especialización de las del riñón o del intestino.

Recientemente, en cambio, se han logrado progresos espectaculares en la comprensión de la división celular.* En este caso, la forma de la célula se modifica profundamente, su arquitectura cambia y el citoesqueleto sufre transformaciones muy importantes.[(1)] Probablemente, los principios descubiertos en este modelo servirán de base para comprender la génesis de las diversas formas celulares.

Cuando una célula se divide, los cromosomas se separan en dos lotes y se distribuyen en las células hijas gracias a un aparato especial, el huso mitótico. Se trata de un haz de fibras compuesto esencialmente de microtúbulos dispuestos en un huso bipolar, a la manera de los meridianos entre los dos polos de un mapamundi (fig. 2). Inicialmente, los cromosomas se reúnen en el ecuador para, luego, migrar hacia los polos. El ensamblaje del huso mitótico es transitorio: se forma inmediatamente antes de la división celular para desaparecer cuando se separan las células hijas. En el intervalo que transcurre entre dos divisiones, el interior de la célula es atravesado por una red de largos microtúbulos los cuales irradian, a partir del «centrosoma», una estructura con proteínas, que sirve para iniciar el ensamblaje de los microtúbulos.

Las modificaciones del citoesqueleto durante la división celular plantean

## Los motores moleculares dirigen la danza

*Figura 2.*
*Modelos de ensamblaje del huso bipolar. Su aparición marca el principio de la división (arriba). Según el modelo clásico (a la derecha), los microtúbulos que irradian a partir de dos centrosomas son captados y estabilizados por los cinetócoros en los cromosomas. En el nuevo modelo (a la izquierda) no son necesarios ni los centrosomas ni los cinetócoros. El huso se organiza gracias a la acción de dos motores moleculares que se desplazan en sentido inverso a lo largo de los microtúbulos (hacia el extremo «+» o hacia el extremo «–»). La dineína ensambla los microtúbulos en haces, mientras que la acción conjugada de la cinesina fijada sobre los cromosomas los separa en dos polos.*

**DIVISIÓN CELULAR**
o mitosis. Mediante este proceso, una célula del organismo da origen a dos células hijas, cada una de las cuales tiene un lote de cromosomas, permitiendo así el crecimiento de los tejidos o su renovación en el adulto.

dos preguntas interesantes para la morfogénesis: ¿qué mecanismo permite la reorganización de la red de microtúbulos en un haz bipolar? ¿Cómo pueden los microtúbulos organizarse tan exactamente alrededor de los cromosomas en dos, y solamente dos, poblaciones de polaridades opuestas? Esta pregunta es tanto más importante cuanto que la bipolaridad del haz tiene una función capital: permitir la distribución de los cromosomas en las dos células hijas.

Un elemento importante: desde principios de los años 1990, se sabe que las células crecen y se dividen bajo el control de una batería de enzimas. Se trata de un conjunto de proteínas compuesto fundamentalmente por quinasas y fosfatasas. Estas enzimas son capaces de actuar sobre otras proteínas y modificarlas, añadiéndoles o retirándoles moléculas de fosfato.

La división es inducida cuando se activa una quinasa especial (la cdc2 quinasa). Al provocar la modificación de toda una serie de proteínas, esta quinasa cambia completamente el estado de la célula. La envoltura del núcleo se disuelve, los cromosomas se individualizan y la red de microtúbulos se destruye. Nuevos microtúbulos se ensamblan en dirección a los cromosomas y forman un huso bipolar. Tenemos, pues, aquí un ejemplo tipo de morfogénesis en el que un grupo de proteínas (los enzimas del ciclo celular) rige la organización en el tiempo y en el espacio de unas estructuras muy concretas: los microtúbulos.

**LOS MOTORES MOLECULARES** son proteínas capaces de desplazarse a lo largo de los filamentos de actina o de los microtúbulos y producir una fuerza mediante la transformación de la energía química liberada por la hidrólisis de adenosina trifosfato (ATP, el «carburante» celular). Se dividen en tres grandes familias: las dineínas, las cinesinas y las miosinas, muy conocidas por su función en la contracción de los músculos.

## Un experimento en el que los cromosomas se han sustituido por bolas magnéticas recubiertas de DNA

¿Cómo aparece un huso mitótico? Un modelo ya clásico es el que propusieron hace diez años Marc Kirschner y Tim Mitchison (fig. 2).[1] En este modelo, dos tipos de actores determinan el ensamblaje del huso. Por una parte, los centrosomas (esta estructura se ha desdoblado antes de empezar la división). De los dos polos es de donde parten los microtúbulos en formación. Por otra parte, los cinetócoros* situados en los cromosomas, que capturan y estabilizan los microtúbulos.

El modelo se basa en el hecho de que los microtúbulos son muy dinámicos: crecen durante un tiempo, pero jamás llegan a ser muy largos antes de empezar a despolimerizar. El huso se formaría cuando los microtúbulos son capturados por los cinetócoros, dispuestos dorso contra dorso en cada cromosoma. Sin embargo, este modelo es muy incompleto y, sobre todo, no resiste el examen si se aplica a las plantas. Las células vegetales no contienen centrosoma y, sin embargo, en ellas puede observarse el ensamblaje de un huso mitótico durante la división.

Es este modelo el que nuestro grupo de Heidelberg acaba de poner en duda.[2] Especialmente con Rebecca Heald y Tony Hyman, hemos examinado de nuevo el mecanismo de ensamblaje del huso, pero en condiciones muy particulares, *in vitro*. Hemos reconstruido su medio celular en un tubo de ensayo utilizando extractos de óvulos de sapo y cromosomas artificiales (bolas magnéticas recubiertas de DNA). El objetivo era prescindir de los dos actores determinantes del modelo precedente: los cinetócoros y los centrosomas.

Además, este modelo elimina toda indicación espacial que pudiera existir en la célula. A pesar de todo, en estas condiciones, comprobamos que aparecía un huso mitótico. Los microtúbulos empiezan creciendo en todas direcciones alrededor de los cromosomas artificiales. Luego, se alinean para formar finalmente un huso bipolar. ¿Cómo puede ocurrir esto? ¿Cómo, sin ninguna indicación preexistente, puede organizarse una forma así, con dos polos opuestos, y solamente dos? Todo parece indicar que esta reorganización se debe a la actividad de motores moleculares,* unas proteínas capaces de desplazarse a lo largo de los microtúbulos. Algunos se desplazan hacia el extremo «−» de los microtúbulos (motores de tipo dineína), mientras que otros, fijados en los cromosomas, se desplazan en sentido inverso, hacia el extremo «+» (motores de tipo cinesina).[3,4]

En el nuevo modelo, el huso bipolar se construye simplemente a causa de la polaridad de los propios microtúbulos, de la actividad de los motores moleculares que leen esta polaridad, y de la asimetría relacionada con la presencia de los cromosomas naturales o artificiales.[5] en un primer tiempo, por efecto local, unos microtúbulos cortos y dinámicos se ensamblan cerca de los cromosomas. Luego, motores de tipo dineína hacen deslizar estos microtúbulos unos sobre otros y los agrupan en un haz.

Los microtúbulos paralelos se orientan primero de manera aleatoria, en un sentido o en otro. Pero, simultáneamente, son capturados por los motores de tipo cinesina, asociados a los cromosomas.[6] Por simple acción de los dos tipos de motores, los microtúbulos del haz se separan entonces en dos poblaciones, a uno y otro lado de los cromosomas. Los extremos «+» permanecen próximos a los cromosomas, mientras que los extremos «−» se alejan para formar los dos polos.

## Un modelo similar podría explicar, por ejemplo, la construcción del andamiaje de las prolongaciones nerviosas

Así pues, en la célula, no parece que los centrosomas sean indispensables para la organización del citoesqueleto durante la división. Su papel no está todavía muy claro. Es cierto que guían la orientación del huso, el cual, a su vez, determina el plan de división celular.[7]

Este modelo intenta explicar cómo la información lineal almacenada en los genes puede conducir a la aparición de una forma compleja. Demuestra que el control de las propiedades físicas del citoesqueleto permite la aparición de una nueva estructura en la célula. El ensamblaje del huso parece estar regido por un «campo morfogenético» definido por la presencia simultánea de tres elementos: proteínas estructurales, motores moleculares y enzimas que coordinan las interacciones entre estos diversos componentes. En el futuro, tales resultados deberían aportar luz sobre la morfogénesis celular y embrionaria. Por ejemplo, ciertas prolongaciones de las neuronas (las dendritas) están jalonadas por haces de microtúbulos orientados de manera no homogénea.

Acaba de demostrarse que la organización de estos haces depende de un transporte de microtúbulos efectuado por motores moleculares.[8] Por tanto, la organización del citoesqueleto en tres dimensiones en diversos tipos de células podría tener su fundamento en principios similares a los que se han puesto de manifiesto en la división celular.

E.K. e I.V. ■

(1) M. Kirschner y T. Mitchison, *Cell*, 45, 329, 1986.
(2) R. Heald *et al.*, *Nature*, 382, 420, 1996.
(3) B. Alberts *et al.*, *Molecular Biology of the cell*, Garland Publishing Inc., Nueva York, 3ª edición, 1994.
(4) I. Vernos y E. Karsenti, TICB, 5, 297, 1995.
(5) A.A. Hyman y E. Karsenti, *Cell*, 84, 401, 1996.
(6) I. Vernos *et al.*, *Cell*, 81, 117, 1995.
(7) E. Karsenti *et al.*, *Sem. Cell Biol.*, 7, 367, 1996.
(8) D.J. Sharp *et al.*, *J. Neurosci.*, 16, 4.370 1996.

***Para más información***
■ E. Karsenti, «Vers une description moléculaire de l'assemblage du fuseau mitotique», *Médecine/Sciences*, 9, 131, 1993.
■ J.S. Hyams and C.W. Lloyd, *Microtubules*, Wiley-Liss Inc., 1994.
■ A. Murray et Hunt, *The Cell Cycle*, W.H. Freeman and Co., Nueva York, 1993.

# LA GUERRA DEL GOLFO, UN FAROL TECNOLÓGICO

Robert Bell

## Las armas sofisticadas y muy caras no necesariamente son muy eficaces

**ROBERT BELL** es profesor de economía del Brooklyn College City University of Nueva York. Su última obra, *Impure Science* (Wiley, 1992) analiza las relaciones entre la ciencia, el dinero y la política en Estados Unidos. Está preparando un libro sobre la Europa tecnológica.

**Se da por supuesto que los misiles inteligentes y los aviones furtivos ganaron la guerra del Golfo. Pero un informe parlamentario norteamericano y ciertas informaciones confidenciales recogidas por *Mundo Científico* demuestran que esta afirmación es falsa: los F-117 no fueron abatidos porque volaron muy poco; los misiles Tomahawk no dieron en el blanco tantas veces como se dijo, muchos equipos sofisticados no funcionaron, etc. Para alcanzar los objetivos militares, unos ingenios más baratos habrían sido igual de eficaces.**

El 2 de julio, el General Accounting Office, órgano de investigación del Congreso de Estados Unidos, hizo público un informe de trece páginas titulado «Operación Tempestad del Desierto: evolución de la guerra aérea».[1] Estas trece páginas, resumen de un informe de doscientas cincuenta, son las únicas que escaparon a la clasificación como «secreto de defensa» impuesta por el Pentágono. No obstante, incluso reducido a estas conclusiones, el informe del GAO contradice las afirmaciones del Pentágono y de industriales armamentísticos en la época de la guerra del Golfo. En 1991, en efecto, éstos no cesaban de elogiar la eficacia de los armamentos sofisticados más costosos, como el avión «furtivo» F-117, equipado con bombas «inteligentes» guiadas por láser*, a la vez que minimizaban los resultados obtenidos por aparatos menos sofisticados y mucho más baratos, como el avión A-10. En la conclusión de su informe, el GAO escribió que «un gran número de las afirmaciones realizadas después de la guerra por el ministerio de Defensa y los industriales acerca de los resultados obtenidos por ciertos sistemas de armamento, especialmente el F-117, el misil de crucero Tomahawk (TLAM, Tomahawk Land-attack Missile) y las bombas guiadas por láser eran exageradas, falaces, contradictorias con los mejores datos disponibles o inverificables».

* Las bombas «inteligentes» son guiadas hacia su objetivo por un haz láser que los señala desde el bombardero o desde un «iluminador» en tierra. Las bombas de gravitación carecen de guiado y su trayectoria es puramente balística.

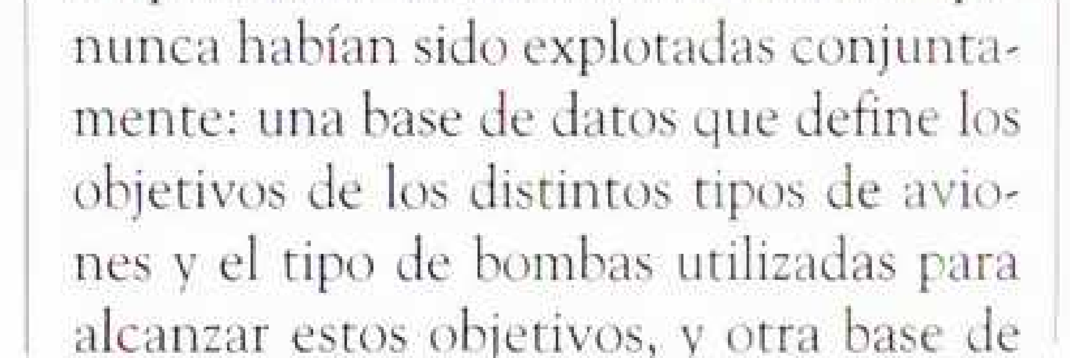
Pero muchos datos en los que se basa este juicio siguen sometidas al secreto de defensa. Para Ernest Fitzgerald, el más alto funcionario civil de la US Air Force (equivalente al de un general de tres estrellas) y partidario de la reducción del despilfarro de su administración: «Se trata tal vez de un nuevo caso de uso abusivo del secreto de defensa con el que se pretende más evitar una situación molesta que proteger la República de un eventual enemigo. Podría ser que el Pentágono buscara protegerse de la justa cólera de los contribuyentes».

El senador del Partido Demócrata David Pryor, quien, junto con John Dingell, miembro del Congreso y también del mismo partido, había solicitado la publicación de este informe, escribió al ministro de Defensa para pedirle «un reexamen de la clasificación como secreto de defensa por parte de unos funcionarios menos sometidos a la influencia de los servicios del ejército».

Dingell y Pryor son de los pocos parlamentarios que se han opuesto de manera consecuente al fraude, el despilfarro y las prácticas abusivas del Pentágono y sus proveedores. La mayoría de los miembros del Congreso, lo mismo que los presidentes Bush y Clinton, no movieron un dedo para lograr la transparencia en lo tocante a las armas utilizadas durante la guerra del Golfo. Los senadores, los representantes y los presidentes reciben importantes «contribuciones de campaña» de los proveedores del Pentágono; los parlamentarios más influyentes logran unos empleos extremadamente lucrativos al término de su carrera política. Por ejemplo, Norman Mineta, que en octubre de 1995 estaba a mediados de su mandato, abandonó la Cámara de Representantes, donde era el principal representante demócrata de la Comisión de Transportes, por un cargo de responsable de sector de equipos de transporte terrestre en Lockheed, uno de los pricipales proveedores del ejército (incidentalmente, fabricante de F-117).

El Congreso, Georges Bush y Bill Clinton pudieron conceder al ejército un total de 58.000 millones de dólares para la adquisición de 300.000 ejemplares de treinta y tres tipos diferentes de armas guiadas de alta tecnología. Habida cuenta de los datos existentes, aunque todavía sometidos al secreto de defensa, acerca de los antecedentes de esta clase de armas, el GAO cree que este programa de adquisición no requiere «pruebas complementarias». Una importante revista de la industria militar, *Defense News*, en la que figura muchísima publicidad para los fabricantes de este tipo de armas, calificó en un editorial el informe del GAO como «un misil ciego que podría poner en entredicho los beneficios de la decisiva victoria de los aliados en la guerra del Golfo».[2]

Un mes antes, *Defense News* informaba de que, entre 1991 y 1994, Arabia Saudí y Kuwait compraron armamento por un valor de 36.000 millones de dólares, de los que los dos tercios correspondían a compras a industriales norteamericanos.



En una larga entrevista telefónica, un asistente parlamentario de alto nivel, particularmente bien informado sobre todos los aspectos del informe y de las distintas versiones que no se han hecho públicas, nos explicó que «el GAO reunió por primera vez dos bases de datos en poder del ministerio de Defensa que nunca habían sido explotadas conjuntamente: una base de datos que define los objetivos de los distintos tipos de aviones y el tipo de bombas utilizadas para alcanzar estos objetivos, y otra base de

(1) GAO/PEMD-96-10, *Operation Desert Storm, Evaluation of the Air War*, Washington D.C., octubre de 1996.

(2) *Defense News*, 22-28 de julio de 1996.

datos que, para los distintos tipos de objetivos, precisa el resultado efectivo de los *raids* aéreos».

Debido a la confidencialidad del informe, el asistente parlamentario no estaba autorizado a comunicarnos todos los datos. Pero nos indicó algunos de sus elementos: «Puedo decirles lo que es falso, pero no darles datos positivos», nos declaró antes de rechazar una tras otra las diversas afirmaciones relativas al avión furtivo F-117.

Se ha dicho, por ejemplo, que el índice de eficacia del F-117 era del orden del 80 %. «El GAO llegó a la conclusión de que esta cifra era completamente falsa y muy por encima de la verdad», declaró el asistente parlamentario.

El F-117 también fue descrito como totalmente indetectable por radar y capaz de prescindir del apoyo de aparatos especializados en cegar los radares enemigos. Por ello, se dijo, el F-117 no fue apoyado por aviones especializados durante la guerra del Golfo. «El GAO ha analizado estas informaciones y ha llegado a la conclusión de que eran inexactas y falaces», según declaró nuestro interlocutor.

Según otra afirmación, el F-117 habría destruido el sistema de defensa aérea integrada de Irak desde las primeras horas de la primera noche de la guerra. «El GAO ha llegado a la conclusión de que esta afirmación era falsa.»

También se había afirmado que el aparato podía actuar sea cuales fueren las condiciones meteorológicas. «El GAO ha llegado a la conclusión de que esta afirmación era falsa».

**La humedad, incluso la del desierto arábigo, reducía la eficacia de los sistemas infrarrojos**

Según nuestro interlocutor, «el GAO considera falsas las afirmaciones de que distintos aparatos o armamentos estaban adaptados a todas las condiciones meteorológicas o podían ser utilizados en caso de condiciones meteorológicas desfavorables (las bombas guiadas por láser, los misiles anticarro Maverick, las bombas ópticas eléctricas Wall-Eye y los misiles de crucero Tomahawk)».

El resumen del informe del GAO añade al respecto que la eficacia de los sistemas electroópticos también estaba «gravemente afectada por la presencia de nubes, lluvia, niebla, humo, o incluso un fuerte grado higrométrico del aire». Los pilotos participantes en la guerra del Golfo declararon al GAO que la humedad, incluso en el desierto árabe, constituía un verdadero problema para los sistemas de infrarrojos. (Desde hace unos años, el GAO critica el hecho de que el Pentágono no verificara un cierto número de armas antes de emplearlas o maquillara los resultados de estos tests.[1] En caso de humedad, un detector de infrarrojos debe estar mucho más cerca del blanco para que el piloto identifique una mancha en la pantalla. «Los pilotos dieron al GAO unos órdenes de magnitud que están sometidos al secreto de defensa —nos declaró el asistente parlamentario—, pero debían acercarse mucho más a los blancos.» Al acercarse a sus objetivos, los pilotos ponían en peligro sus vidas. Según el asistente parlamentario, «la humedad reduce la *distancia de seguridad* de algunos de dichos sistemas; ahora bien, la capacidad de alejamiento con respecto al objetivo es precisamente una de sus ventajas».

En lo relativo a los misiles de crucero Tomahawk, las conclusiones del informe del GAO contradicen las aserciones del Pentágono y de los industriales del armamento. Éstos pretendieron, por ejemplo, que el índice de «lanzamientos exitosos» del Tomahawk era del 98 %. No obstante, siempre según el asistente parlamentario, «nos quieren hacer creer que este porcentaje concierne a los blancos de los misiles.



***El primer vuelo de un prototipo del F-117*** *data de junio de 1981. Este avión (a la izquierda y en la foto adjunta) fue el primero diseñado con un objetivo de furtividad máxima a fin de limitar su detección por los radares. Se trata de un bombardero subsónico, con poca capacidad de maniobra. En 1991, la US Air Force disponía de cincuenta y seis F-117 operacionales, de los cuales cerca de cuarenta y cinco intervinieron en la guerra del Golfo. (Fotos B. Thouanel.)*

*Mundo Científico* ha publicado:
(1) «Los recovecos de los fracasos tecnológicos norteamericanos», noviembre, 1994.

En realidad, lo que significa es que han conseguido sacarlos de su silo un 98 % de las veces».

«Incluso impusieron el secreto de defensa a algunas de sus afirmaciones públicas precedentes», añadió indignado nuestro interlocutor. «Impusieron el secreto de defensa a prácticamente todas las evaluaciones numéricas del GAO relativas a la eficacia de los sistemas de armamento. El ministerio de Defensa, por ejemplo, anunció que el índice de eficacia del F-117 era del 80 %. Este porcentaje es falso y la evaluación del GAO ha sido sometida al secreto de defensa. Según el *New York Times*, este índice de eficacia sería en realidad del 40 %.»

Se lee en el resumen del informe del GAO que «el nivel de eficacia correspondiente a "un objetivo, una bomba" no fue alcanzado. La campaña aérea no confirmó en absoluto la precisión y la eficacia pretendidas de las bombas guiadas». El texto publicado nota también que «habida cuenta de los resultados y la eficacia de que dieron prueba en la guerra del Golfo, es inexacto calificar los aparatos más caros de más fiables que los de menor coste».

«El GAO ha señalado un cierto número de casos en que los sistemas de armamento de menor coste lograron mejores resultados que los sistemas más caros», comentó el asistente parlamentario tomando el ejemplo del A-10 comparado con un aparato sofisticado como el F-117. Estos dos aviones fueron ideados para tipos de misiones diferentes, pero fueron ambos ampliamente utilizados durante la guerra del Golfo.

«El F-117 no puede volar de día. No es furtivo de día porque puede ser localizado visualmente.» Y tomado como blanco. Al parecer, la US Air Force estaba decidida a que ningún F-117 fuera abatido, lo que permitía, cabe suponer, alabar su superioridad. «El F-117 no realizó ninguna operación diurna, absolutamente ninguna, durante la guerra del Golfo», nos indicó el asistente parlamentario. Ningún F-117 fue abatido o tocado. En el caso del A-10, en cambio, veinticinco aparatos fueron tocados y seis abatidos. Pero este aparato voló día y noche a razón de dos o tres salidas cada 24 horas. Aunque más fácil de detectar de día que el F-117, el A-10 llevaba un blindaje reforzado. «Se trata de un carro volador diseñado para resistir los tiros de obús cuando se le toma como blanco. Este aparato puede atacar blindados, blancos en movimiento, blancos imprevistos u objetivos ocasionales. Indudablemente, el F-117 no puede enfrentarse a este tipo de blancos. No está equipado para ello. Pero el F-117 no puede realizar tantas salidas diarias como el A-10. Su plan de vuelo debe diseñarse para evitar cuidadosamente los radares.» De hecho, la US Air Force no pretende que el F-117 sea *invisible*, sino simplemente menos detectable que otros aviones. «Por ello, la organización de cada una de sus misiones es muy compleja», prosigue nuestro interlocutor. «Este trabajo de planificación que toma tanto tiempo no es necesaria en el caso del A-10.»



***El A-10, construido por Fairchild Republic,*** *es un birreactor monoplaza, lento (480 km/h) pero potentemente armado y fuertemente blindado. El piloto está sentado en una cabina de titanio que resiste proyectiles de 23 mm. La US Air Force compró más de setecientos A-10 entre 1977 y 1984. (Foto Dite/Nasa.)*

Otro tema: ¿son las bombas guiadas más eficaces que las convencionales? A esta pregunta, el resumen del informe responde que, sobre la base de los mejores datos disponibles, «es imposible definir la proporción de objetivos alcanzados con éxito por los sistemas guiados». Una nota precisa: «Dado que los objetivos fueron generalmente valorados de manera episódica y, en la mayoría de los casos, después de haber sido tomados como blancos durante un cierto tiempo por diversos tipos de aparatos y de bombas, es imposible determinar los daños atribuibles a los distintos tipos de bombas y a los distintos tipos de aparatos.» El GAO, no obstante, hace notar en conclusión que los sistemas de armamento *inteligentes* «constituyeron la parte esencial de los gastos de armamento. En volumen, las bombas guiadas constituyeron sólo el 8 % del total de las bombas utilizadas en el campo de batalla; su coste, sin embargo, alcanzó el 84 % de los gastos totales de munición».

Además, las bombas guiadas no siempre fueron usadas de conformidad con sus normas de utilización. Si tal hubiera sido el caso, el número de pilotos norteamericanos abatidos habría sido mucho mayor. Para evitar las defensas aéreas iraquíes, los aviones norteamericanos *higtech* volaban a gran altura pero utilizaban unas bombas guiadas diseñadas para ser soltadas a altitudes muy inferiores.

No es sorprendente, pues, leer en el resumen del informe que «por término medio, más de once toneladas de bombas guiadas y cuarenta y cuatro toneladas de bombas no guiadas fueron lanzadas sobre blancos considerados como eficazmente destruidos. No obstante, una cantidad todavía mayor de estos dos tipos de bombas fueron soltadas sobre blancos para los cuales los objetivos no fueron enteramente alcanzados».

«Las bombas inteligentes no pueden constituir la única clase de armamento»

La coalición, no obstante, ganó la guerra. ¿Cómo explicarlo, pese a las deficiencias de las armas más sofisticadas? El resumen del informe subraya el carácter masivo del asalto: «La cantidad de bombas norteamericanas lanzadas diariamente representó el 85 % de la cantidad media cotidiana de bombas lanzadas sobre Alemania y Japón durante la segunda guerra mundial». Además, «el éxito de la campaña aérea prolongada se explica por la utilización de una mezcla de armamentos ofensivos y de apoyo. La potencia aérea efectiva fue debida esencialmente a la variedad y al número de aparatos de tipo aire-tierra tales como los bombarderos de fuerte tonelaje (B-52) y las plataformas de lanzamiento de bombas guiadas (como los aviones furtivos F-117 y los aviones de rotación rápida tales como los A-10)».

Algunos altos responsables militares no están satisfechos con el peso creciente de las armas «inteligentes» en el armamento norteamericano.

**R.B.**

# LAS LECCIONES DE UNA DISCORDANCIA

Louis Géli y Brian West

## «Puntos fríos» para completar la mecánica de placas

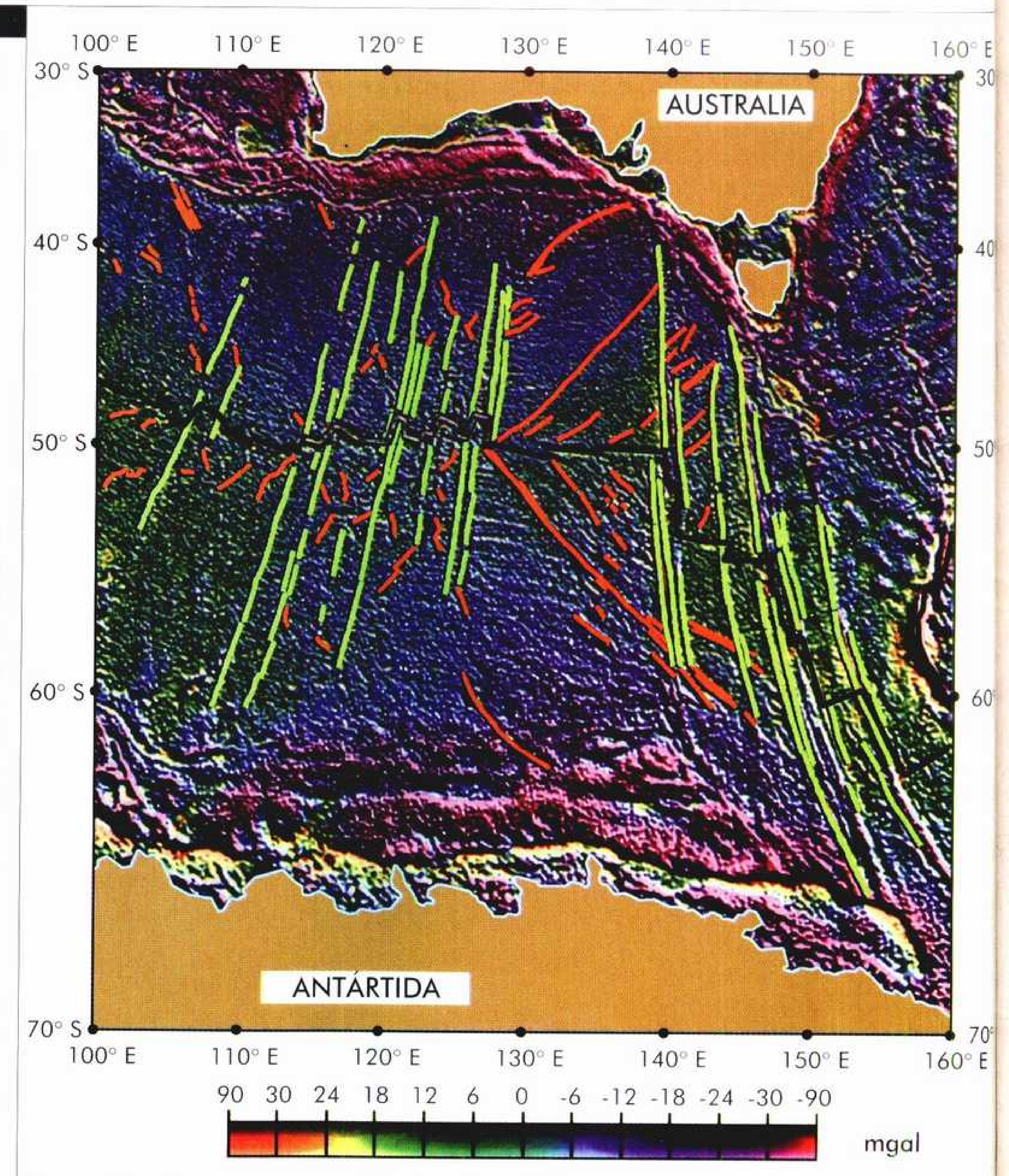
**A dos pasos del polo sur, atrapada entre Australia y la Antártida, una masa de materia fría se hunde hacia el centro de la Tierra. Este «punto frío» permite integrar en un mismo modelo la convección en el manto terrestre, los puntos calientes y la acreción oceánica. Se presenta aquí un esbozo del que podría ser uno de los eslabones perdidos de la teoría de la tectónica de placas.**

**LOUIS GÉLI,** geofísico, Departamento de Geociencias Marinas de la Dirección de Investigaciones Oceánicas del Ifremer (Plouzané, Francia). Louis.Geli@ifremer.fr

**BRIAN WEST,** geofísico, School of Oceanography, University of Washington, Seattle, EE.UU.

La teoría de la tectónica de placas proporciona un modelo que es a la vez descriptivo y predictivo, y que permite interpretar la mayor parte de los fenómenos geológicos que se observan en la superficie de nuestro planeta. Según este modelo, el material caliente que llega en forma de magma al eje de las dorsales oceánicas llega del interior de la Tierra para formar la corteza oceánica. Este material es luego transportado por el movimiento de las placas y finalmente reciclado al nivel de las fosas de subducción, donde se hunde hacia el interior de la Tierra. Aunque ha revolucionado las ciencias de la Tierra, esta teoría es incompleta al menos en dos puntos. En primer lugar, describe el movimiento de las placas pero no las

**LA PROFUNDIDAD** (400 km), la geometría y la amplitud (300 °C) de la anomalía de la temperatura son totalmente arbitrarias en este modelo, habida cuenta de las incertidumbres actuales. Se sabe que el olivino, principal mineral constitutivo de las rocas del manto superior, sufre una transformación mineralógica a 400 km de profundidad, por efecto de la presión. A esta transformación (llamada «a fase espinela») está asociada una discontinuidad de velocidad sísmica detectada por los sismólogos. En este modelo, consideramos una «caja» de 400 kilómetros de grosor (véase la fig. 2), de modo que nos situamos por encima de esta discontinuidad.




°0°
°30° W
°30° E
°60° W
°60° E
90° W
°90° E
°120° W
°120° E
°150° W
°150° E
°180°

**Figura 1. La Discordancia Australia-Antártida.** *Las anomalías de la gravedad (en mgal) calculadas a partir de las medidas altimétricas de muy alta resolución de los satélites GEOSAT, ERS-1 y TOPEX-POSEIDON están correlacionadas directamente con los relieves submarinos de longitud de onda comprendida 25 y 200 kilómetros (amarillo y rojo para las zonas menos profundas; azul, violeta y malva para las más profundas). Se observa: el eje de la dorsal Sudeste Índica (a trazos negros); las trazas de las zonas de fractura fuera de la zona axial (a trazos verdes); la Discordancia Australia-Antártida (a dobles trazos), una zona en la que la dorsal está segmentada por zonas de fractura (en verde) próximas y muy marcadas; y unas estructuras en «V» (en rojo) que apuntan hacia la Discordancia a uno y otro lado del eje de la dorsal.*

*El mapa de las anomalías de la velocidad de propagación de las ondas de cizalladura (a la izquierda) obtenido por Geneviève Roult y sus colegas sismólogos del Instituto de Física del Globo de París a partir de la inversión tomográfica de los datos registrados por la red GEOSCOPE indica la distribución de las masas en profundidad. Las anomalías de la velocidad (expresadas en % respecto a una velocidad media de referencia) en un corte longitudinal situado a una profundidad del orden de 250 kilómetros revelan las zonas más «calientes» del manto superior (velocidades lentas respecto al modelo de referencia; en rojo y amarillo), y las zonas más «frías» (en azul y negro).*

**8 CM/AÑO** corresponde aproximadamente a la velocidad de separación actual, que se puede medir directamente por medio de balizas ultraprecisas de posicionamiento por satélite, del tipo DORIS.

fuerzas responsables de estos movimientos. En segundo lugar, es incapaz de explicar el origen del volcanismo en el interior de las placas como no sea invocando de forma independiente otra teoría, un *deus ex machina* según el cual unos penachos de material caliente ascenderían desde la base del manto terrestre a partir de «puntos calientes»; unos puntos calientes que se suponen fijos unos respecto a otros y *a priori* desacoplados del movimiento de las placas.

Una nueva generación de modelos numéricos, a la vez tridimensionales y esféricos, nos muestra que la convección en el interior de la Tierra, que es la causa del movimiento de las placas, estaría constituida por corrientes descendentes, que aparecen en forma de plegamientos y por corrientes ascendentes que se manifiestan en forma de penachos.[1] Al asociar claramente las corrientes descendentes y frías a las placas de subducción, y las corrientes ascendentes a los penachos de puntos calientes, estos modelos globales proporcionan actualmente el marco de una teoría unificadora satisfactoria. No obstante, como los cálculos no tienen en cuenta las placas tectónicas, no siempre es posible relacionar la circulación en el manto con los límites de las placas y con las estructuras de la superficie a ellas asociadas, como las dorsales oceánicas. ¿Puede llenar este hueco el estudio de la Discordancia Australia-Antártida, un punto frío del manto terrestre?

Situada entre 120° y 128° de longitud este, en el centro de una gran depresión que se extiende desde la mitad sur de Australia hasta la Tierra de Wilkes en la Antártida, la Discordancia Australia-Antártida es una región enigmática en la que la profundidad* del suelo oceánico cae bruscamente de 3.000 a 4.500 metros (fig. 1).[1] Esta zona única se identificó en 1974 como un punto frío (por oposición a un punto caliente) y, por analogía con las fosas de subducción, con la posible manifestación de una corriente descendente hacia las profundidades del manto terrestre.

Pero la lejanía, las dificultades de acceso y las temibles condiciones de navegación (entre las peores que se pueden encontrar en la superficie del Globo) hacen que el estudio de esta región sea muy difícil. Poco conocida, poco comprendida, la Discordancia quedó relegada durante mucho tiempo al museo de las curiosidades geológicas. No era más que un caso extremo, el extremo opuesto de Islandia donde, a la inversa, la dorsal Medio Atlántica emerge debido a la presencia de un punto caliente subyacente. Sin embargo, está ahora claro que se trata de un laboratorio natural de una riqueza excepcional para el estudio de la dinámica del manto superior y de la acreción oceánica.

¿Por qué centra súbitamente la atención la noción de punto frío? De una parte, las técnicas tomográficas de auscultación del interior de la Tierra, que han experimentado un desarrollo considerable durante los últimos años, demuestran sin ambigüedad que las ondas sísmicas son más rápidas bajo la Discordancia que en las zonas vecinas.[2] Dado que la velocidad de una onda es mayor cuando el medio en que se propaga es más denso y por lo tanto más frío, la Discordancia está manifiestamente asociada a una zona del manto relativamente «fría». La disminución relativa de la temperatura a algunos centenares de kilómetros de profundidad podría ser del orden de 300 °C, si bien la geometría, las dimensiones y la amplitud de esta anomalía de la temperatura resultan difícilmente cuantificables y están sujetas a controversia. Aquí, se destacará solamente que los conductos de los penachos de los puntos calientes no son visibles por tomografía sísmica, ya que ésta no tiene la resolución suficiente, a diferencia del punto frío de la Discordancia Australia-Antártida, lo que subraya sus dimensiones muy ampliamente superiores. Siempre según la tomografía, la geometría del punto frío se parecería más a la de una zona de subducción que a la de un punto caliente.

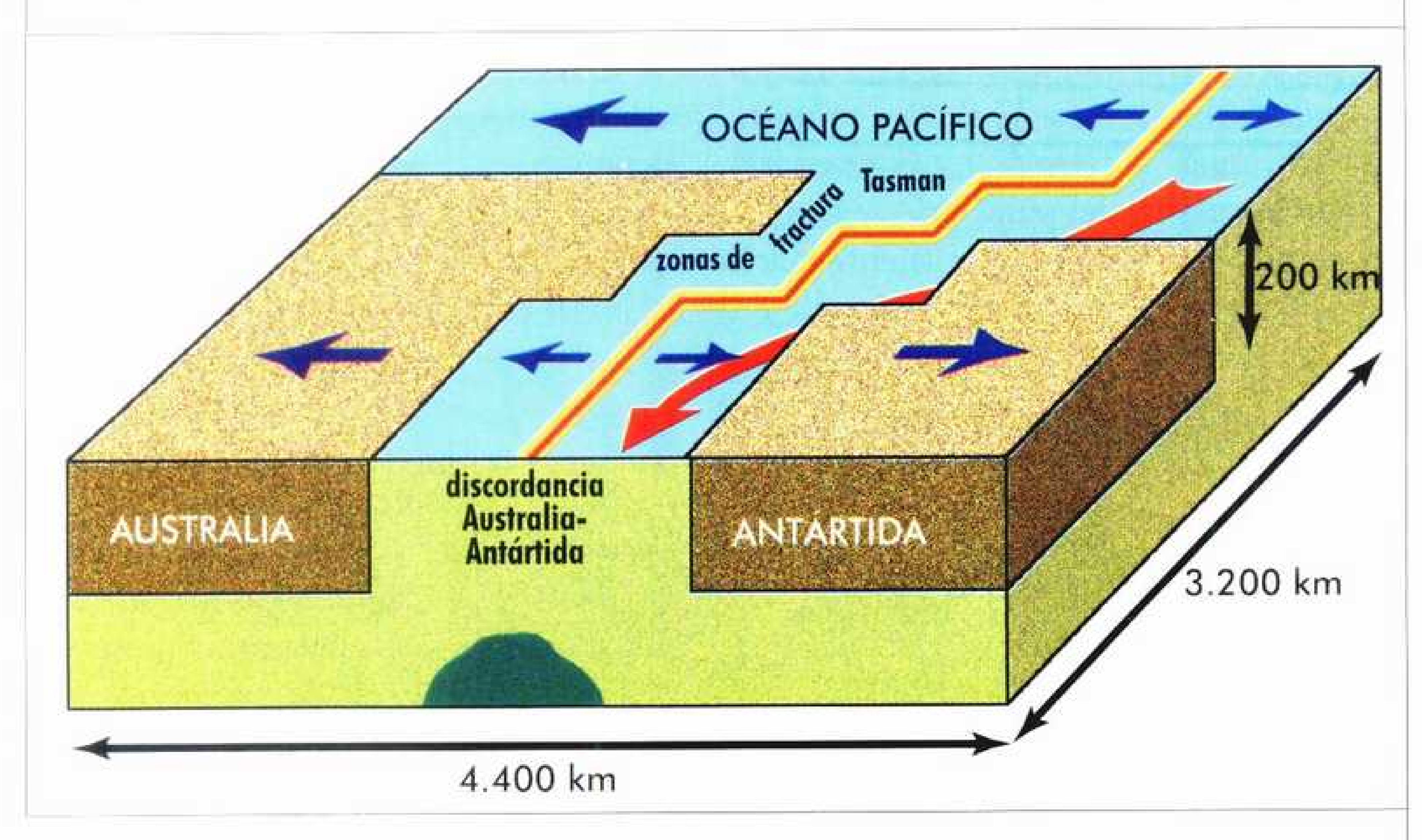



**Figura 2. Representación esquemática de la geometría del modelo (según la ref. 1).** *Las distancias corresponden aproximadamente a las dimensiones del sistema hace unos 20 millones de años. Se considera una capa de un grosor de 400 kilómetros, en la que la viscosidad varía en función de la temperatura y de la presión. Todas las caras de la caja son permeables: el material del manto tanto puede penetrar en la caja atravesando verticalmente la cara inferior como salir horizontalmente por los lados. El punto frío se representa introduciendo arbitrariamente un gradiente en la temperatura del material que penetra por la base, de forma que la anomalía de la temperatura sea nula bajo la zona de fractura Tasman, y del orden de 300 °C bajo la Discordancia Australia-Antártida. Aunque los continentes se separan progresivamente desde hace unos 85 millones de años, la península de Tasmania todavía tocaba la parte oriental de la Tierra de Wilkes, en la Antártida, hace unos 40 a 45 millones de años. Las raíces continentales, de una profundidad de unos 200 kilómetros, bloqueaban entonces la circulación de las corrientes en el manto superior. La separación de las masas continentales y los gradientes de temperatura del manto superior se combinan para crear un flujo astenosférico del Pacífico hacia el océano Índico. El «punto frío» engendra en principio una disminución de la fusión parcial bajo la Discordancia, lo que tiene por efecto la inhibición de la acreción de la corteza oceánica en el eje de la dorsal Sudeste Índica. El flujo astenosférico produce el efecto contrario, alimentando la máquina de fabricar corteza entre Australia y la Antártida.*

## Discordancia Australia-Antártida: un punto de contacto entre dos regiones del manto terrestre

De otra parte, los datos obtenidos en el mar por Charles Langmuir y Emily Klein, del Lamont Doherty Earth Observatory de Nueva York y luego por Dave Christie y Doug Pyle, de la Universidad de Oregón y Jean-Christophe Sempéré, de la Universidad de Washington, subrayan que las propiedades geofísicas y geoquímicas de la dorsal del Sudeste del Índico varían de forma abrupta a nivel de la Discordancia Australia-Antártida. Unos cambios que confirman todos ellos —cada uno de forma independiente— la existencia de una anomalía de la temperatura en el manto terrestre. En el plano de la geoquímica

*Mundo Científico* ha publicado:
**(1)** «La convección en el manto terrestre», nº 149, septiembre, 1994.


**(1)** J.K. Weissel y D.E. Hayes, *J. Geophys. Res.*, 179, 2.579, 1974.
**(2)** G. Roult, D. Rouland, J.-P. Montagner, *Phys. of the Earth and Plan. Int.*, 84, 33, 1994.

isotópica, está ya establecido que la Discordancia Australia-Antártida coincide con la frontera entre una región del manto terrestre asociada al océano Pacífico y otra asociada al océano Índico. Finalmente, las estructuras en V detectadas en el fondo del océano (fig. 1), recuerdan las estructuras de circulación que señalan el punto de contacto entre dos fluidos de propiedades diferentes. Esta analogía sugiere que el manto ha migrado, fluyendo del Pacífico, más caliente, hacia el océano Índico, más frío. Un flujo que, según se deduce de las reconstrucciones de la posición de los continentes con el paso de los tiempos geológicos, se habría iniciado hace unos 35 millones de años, después que la abertura entre Australia y la Antártida pusiese en contacto las dos provincias mantélicas, del océano Índico y del Pacífico.

Nosotros hemos intentado modelizar este mecanismo de circulación utilizando el logicial comercial PHOENICS que normalmente se utiliza en metalurgia para explicar circulaciones de fluidos viscosos, como metales fundidos a muy alta temperatura.[3] Se supone que el manto superior se comporta como un fluido cuya viscosidad disminuye cuando aumenta la temperatura o disminuye la presión. El punto frío se representa manteniendo a través de los tiempos geológicos una anamalía de la temperatura de 300 °C a 400 kilómetros de profundidad en el seno del manto superior entre Australia y la Antártida, unos continentes que se separan a una velocidad constante de 80 kilómetros por millón de años* (fig. 2). La resolución numérica de las ecuaciones de la mecánica de fluidos muestra que la separación de los continentes y la presencia del punto frío se combinan para engendrar una corriente que fluye por el manto superior bajo el eje de la dorsal del Sudeste del Índico, en dirección del Pacífico hacia el océano Índico.

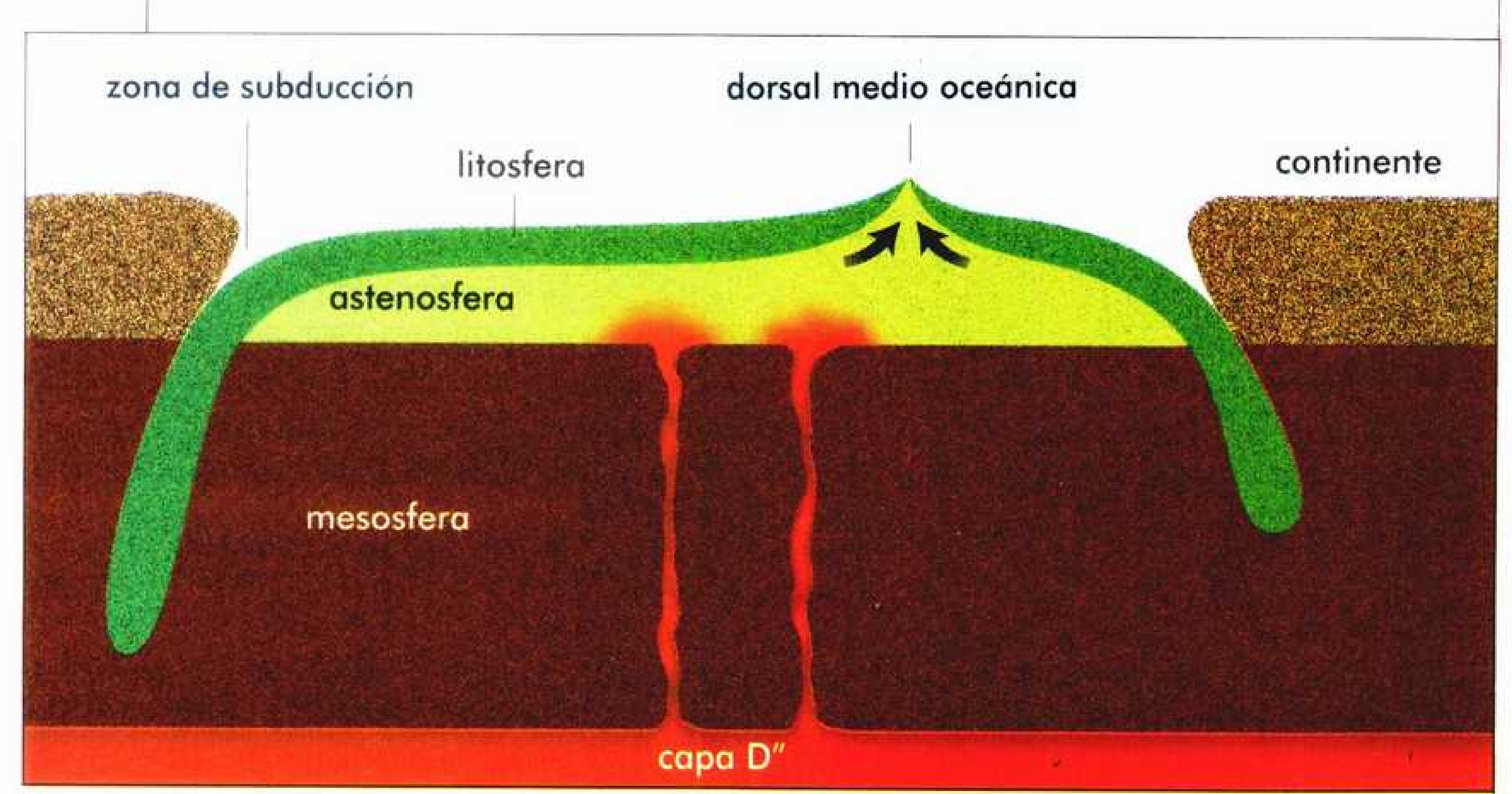



*Figura 3.* ***En el modelo deliberadamente provocador*** *propuesto por Jason Morgan, el inventor de la teoría de los «puntos calientes», y su hijo Jason Phipps-Morgan, la convección en el manto y los movimientos de las placas están desacoplados, salvo en las proximidades de las zonas de subducción, en las que las placas litosféricas se hunden en el interior del manto. La astenosfera se nutre con los penachos de los puntos calientes procedentes de la capa D", que a continuación tienden a circular hacia las dorsales oceánicas con objeto de colmar el vacío creado por la acreción oceánica. Para simplificar, el manto se ha dividido en dos capas: la mesosfera y la astenosfera. Está por establecer la correspondencia entre esta subdivisión, cuanto menos innovadora, y las discontinuidades de las velocidades sísmicas observadas en el interior de la Tierra.*

En el eje de una dorsal, el material caliente tiende a ascender desde el manto superior hacia la superficie y a fundirse parcialmente por descompresión.[4] Hacia 60 u 80 kilómetros de profundidad, la fusión es tan importante que el líquido magmático percola hacia la superficie para alimentar la dorsal en basaltos y formar la nueva corteza oceánica. Cuanto más elevada es la temperatura del manto superior, más importante será la cantidad de corteza producida. En cambio, se concibe que la presencia de un punto frío bajo una dorsal inhiba los flujos ascendentes. En el caso de la dorsal del Sudeste del Índico, sin embargo, la corriente mantélica horizontal procedente del Pacífico tendería a compensar los efectos del punto frío bajo de Discordancia Australia-Antártida, y alimentaría la máquina de producir corteza oceánica en el eje de la dorsal: ¡sin esta corriente, Australia y la Antártida no se separarían sin duda tan rápidamente!

Desde luego, un modelo, incluso cuando permite explicar los datos, no es *la* verdad. En el caso de la Discordancia Australia-Antártida, son aceptables otros modelos, pero éste tiene la particularidad de describir una corriente horizontal de gran amplitud que circula por el manto superior y está asociada a un punto frío. Aunque no nos dice nada sobre el origen de este punto frío (¿es la rama descendente de una corriente fría que se sumerge hacia el interior de la Tierra o una zona de subducción en fase de creación?), nos informa sobre la circulación de las corrientes en la parte superior del manto.

De este modo, la corriente entre Australia y la Antártida podría tener una componente este-oeste no nula, ¡pese a que las placas se desplazan en la dirección norte-sur! A la escala del millar de kilómetros, los otros ejemplos de circulación que se observan en la superficie de la Tierra están generalmente asociados a la presencia de puntos calientes, como el de Islandia y el del archipiélago de las Galápagos.

En estos dos ejemplos, el material del manto se propagaría bajo la litosfera en una capa de un grosor de algunos centenares de kilómetros, hacia las regiones circundantes más frías, pero en una dirección oblicua, sino perpendicular, a la dirección de avance de las placas. El principal obstáculo para la comprensión de estos flujos es que se conoce muy mal la estructura del manto bajo las dorsales y, en consecuencia, las características de la capa en la que se considera que se producen.

En 1914, John Barell emitió la hipótesis de que en el manto superior existía una capa de baja resistencia capaz de circular con objeto de compensar la carga impuesta por los relieves. Esta capa —bautizada astenosfera, del griego *asthénos*, sin resistencia— ha sido asimilada desde entonces por los sismólogos a la zona de pequeña velocidad sísmica que se observa entre 15 y 200 kilómetros de profundidad bajo los océanos. En cambio, para los geoquímicos, se trata de la zona el manto llamada «empobrecida», de la que proceden los basaltos que forman el suelo oceánico.[5] Retomando la definición de Claude Allègre, la astenosfera es «la región del manto situada entre 100 y 400 kilómetros de profundidad. Allí, las ondas sísmicas se atenúan mucho y se cree generalmente que esta capa blanda es la causa del movimiento de las placas litosféricas. Las placas rígidas se deslizarían sobre la astenosfera blanda».[6] Esta confusión de definiciones ilustra por sí sola todos los apuros de la comunidad científica: la astenosfera no es verdaderamente una realidad geológica, sólo es un concepto mal comprendido. Si esto es así, se debe menos a una falta de datos que a la de modelos coherentes que expliquen el origen de una capa de débil resistencia bajo la litosfera.

La idea de que podría haber movimientos horizontales a gran escala en el

(3)
B. West *et al.*, *J. Geophys. Res.*, 1996, en prensa.
(4)
A. Nicolas, *Les Montagnes sous la mer: Expansion des fonds océaniques et tectonique des plaques*, Editions du BRGM, 1989.
(5)
A. Anderson, «Lithosphere, asthenosphere and perisphere», *Reviews of Geophysics*, 1955.
(6)
C.J. Allègre, *L'Ecume de la Terre*, Fayard, 1983.

(7) J. Phipps-Morgan *et al.*, *J. Geophys. Res.*, 12.753, 1995.

interior del manto superior aboga en favor de la hipótesis que sostiene Jason Phipps-Morgan, de la Scripps Institution of Oceanography de San Diego, según la cual la astenosfera se nutriría en parte de los puntos calientes.[7] Caliente y correlativamente más ligero, el material de los penachos mantélicos ascendería hacia la superficie, por efecto del empuje de Arquímides, para quedar capturado en la parte superior del manto (fig. 3). Los gradientes de presión y de temperatura que existen en el interior del Globo favorecerían la circulación de este material que llenaría —en parte— la astenosfera. Esto es lo que parece que ha sucedido al nivel de la discordancia Australia-Antártida: el punto frío habría constreñido a la astenosfera a migrar hacia el oeste bajo la dorsal Sudeste Índica, privilegiando la abertura de una cuenca oceánica entre Australia y la Antártida. Esta visión concuerda bien con la nueva generación de modelos de convección mantélica a escala global descrita por Philippe Machetel, del CNES de Toulouse, en Francia, que hace de los penachos de los puntos calientes una expresión dominante de la convección a gran escala. Una parte del exceso de material inyectado a la astenosfera por los penachos de los puntos calientes podría ser reciclada por corrientes descendentes, mientras que el resto sería expulsado hacia la superficie del Globo para formar la corteza en el eje de las dorsales oceánicas.

L.G. y B.W. ■

MEDICINA

# ¿ES POSIBLE ERRADICAR LA COREA DE HUNTINGTON?

Gérard Lucotte y Jean-Claude Turpin

## La mutación responsable de esta grave enfermedad hereditaria es detectable

Los profesores **GÉRARD LUCOTTE** y **JEAN-CLAUDE TURPIN** codirigen el Centro de Neurogenética de Reims, cuya actividad se centra en el diagnóstico presintomático de los individuos de riesgo en las familias con enfermedad de Huntington

**En 1993, los investigadores aislaron el gen de la corea de Huntington, una afección neurológica grave cuyos primeros síntomas aparecen en la edad adulta. Los descendientes de pacientes coreicos tienen ahora la posibilidad de someterse a un test para saber si son portadores de esta anomalía genética. La experiencia demuestra que sólo un pequeño porcentaje de estos posibles afectados se somete a la prueba.**

La corea de Huntington es una afección neurológica hereditaria muy grave que se transmite en las familias según el modo dominante.* En Europa, la incidencia de la enfermedad es del orden de 1/10.000. La enfermedad se manifiesta generalmente entre los 35 y los 45 años y se caracteriza por movimientos anormales involuntarios y una disminución progresiva de las funciones cognitivas con las consiguientes repercusiones intelectuales además de trastornos psiquiátricos. La evolución es irreversible y, por término medio, la muerte sobreviene quince años después de la aparición de los primeros síntomas. La enfermedad no tiene ningún tratamiento preventivo ni curativo.

En la historia de la Medicina, la enfermedad de Huntington representa el primer ejemplo de una afección de manifestación tardía y de pronóstico fatal, para la cual se ha puesto en práctica un diagnóstico predictivo. Llamado a desarrollarse en el futuro para otras afecciones hereditarias, este procedimiento se aplica a un sujeto adulto antes de que se manifiesten los síntomas. En este caso concreto de la corea de Huntington, el *diagnóstico presintomático* da una información «binaria»: el sujeto desarrollará, o no desarrollará, la enfermedad.

¿De qué antecedentes disponemos actualmente? En 1983, el *locus* del gen implicado en la enfermedad se localizó a nivel del brazo corto del cromosoma nº 4. En el periodo siguiente, se describieron unos marcadores genéticos próximos que permitieron los primeros diagnósticos presintomáticos. Sin embargo, su utilización requería un proceso relativamente complejo, ya que dependía de la obtención de DNA de varios miembros de cada familia afectada. Diez años más tarde,[1] el gen responsable fue identificado por el grupo de investigación colaborador en la enfermedad de Huntington. Bajo el nombre de IT15 («interesting sequence nº 15»), este gen codifica la proteína huntingtoniana. La anomalía es una mutación inestable que consiste en una expansión anormal del número de tripletas CAG (citosina, adenina y guanina, bases del DNA).

En los individuos sanos, el número de estas tripletas repetidas es variable, y va de nueve a treinta y cuatro, mientras que en los enfermos pasan de treinta y seis, y pueden llegar hasta el centenar. Este descubrimiento ha permitido poner a punto un test presintomático de tipo directo (es decir, sin que sea necesario efectuar el estudio familiar). El test se basa en la medida del número de tripletas en los individuos de riesgo, descendientes de personas afectadas. Además, parece que existe una proporcionalidad inversa entre el número de repeticiones de las tripletas y la edad de aparición de los primeros síntomas.[2] Así, pues, el número de tripletas es también un indicador en cuanto a la fecha de aparición de los primeros síntomas de la enfermedad (fig. 1).

**Sin embargo, aunque se practique antes de la manifestación de los síntomas, el test no tiene ninguna utilidad médica: no existe tratamiento preventivo de la enfermedad**

A falta de tratamiento, este test no tiene ninguna utilidad en lo que a prescripción médica se refiere. Es solamente una posibilidad que se ofrece a los sujetos que desean saber si son portadores de la anomalía genética. Está orientado a los sujetos de riesgo, voluntarios e informados. Los candidatos al test aducen tres razones principales: deseo de certidumbre sobre su problema, planificación de su porvenir, toma de una decisión en cuanto a la descendencia.

Una reflexión ética, publicada conjuntamente por la Federación Mundial de Neurología y la Asociación Huntington Internacional, que agrupa las asociaciones de familias, ha definido varios

(1) The Huntington's Disease Collaborative Research Group, *Cell*, 72, 971, 1993.

(2) G. Lucotte *et al.*, *Hum. Genet.*, 95, 231, 1995.

**MEDICINA**

La corea de Huntington es una enfermedad genética de determinismo **DOMINANTE:** entre los descendientes inmediatos de una persona afectada, un individuo de cada dos, por término medio, presentará los síntomas de la enfermedad. Los descendientes de estos individuos, llamados **DE RIESGO PRIMARIO,** tienen, a su vez, una probabilidad sobre cuatro de verse afectados (se dice entonces que son individuos **DE RIESGO SECUNDARIO).**

principios que sirven de base a la práctica del test:[3] el *principio de beneficio* que obtienen el sujeto demandante y sus familiares; el derecho del individuo de tomar una *decisión informada* sobre la práctica del examen —y ello dentro del *respeto a la autonomía* de los participantes—, la *confidencialidad* frente a terceros y, finalmente, *la igualdad de acceso* a este test en el marco del sistema de protección social.

El candidato puede hacer libremente la solicitud del test, sin presiones familiares ni médicas y sin ninguna obligación socioprofesional (empresario, compañías de seguros, etc.). La aceptación de esta demanda requiere la intervención de un equipo multidisciplinario que, bajo la dirección de un médico genetista, agrupa a biólogos moleculares (para el estudio del DNA), clínicos (especialmente un neurólogo para el diagnóstico de corea del familiar enfermo), un psicólogo y una asistente social.

En la práctica, el desarrollo del test pasa por tres fases:

– La *fase preparatoria*, cuyo objetivo es esclarecer la demanda del sujeto voluntario y llegar a la decisión de hacer, o no hacer, el test. Son necesarias de tres a cinco entrevistas: el sujeto es interrogado para que el equipo evalúe su capacidad para entrar en el programa, para que comprenda el carácter del test predictivo y para que explore los eventuales resultados y las consecuencias sobre su propia vida.

– El *test propiamente dicho*, que necesita una toma de sangre del demandante para llegar hasta su DNA. El resultado se da al sujeto verbalmente, después de un plazo previamente fijado (entre quince días y tres semanas).

– La *fase de seguimiento* (al menos, durante dieciocho meses) para acompañar al candidato en la situación que el test le provoca.

En diversos países se han efectuado ya varios experimentos piloto que han aplicado estos tests presintomáticos. Los mejor documentados y más numerosos corresponden a Canadá.[4] También en Estados Unidos se han llevado a cabo algunos de estos tests, lo mismo que en Europa, principalmente en Gran Bretaña, Holanda y Bélgica. Globalmente, estos tests piloto parecen haber sido beneficiosos para la mayoría de los sujetos. Esto es, al menos, lo que se manifiesta con mayor evidencia en los estudios publicados en la literatura médica especializada.[5]

Sin embargo, las personas de riesgo no han demostrado hacia el test todo el interés que parecía desprenderse de los sondeos iniciales. En vez del 60 % a 80 % de intenciones de participación, solamente se presentó menos del 20 % de los candidatos. Todavía no se han explicado los motivos de esta defección.

El promedio de edad de los participantes (del orden de los 35 años) fue sensiblemente más alta de lo previsto. Las mujeres solicitan el test más que los hombres, y los demandantes tienen un nivel de educación alto (estas dos constataciones son válidas, en general, para los diagnósticos genéticos). Entre los resultados, hay más tests negativos (para la presencia de la anomalía genética) que positivos: esto se debe, verosímilmente, al hecho de que muchos solicitantes piensan, en realidad, que no son portadores de la mutación (principalmente, por comparación con la edad de aparición de la enfermedad entre las personas afectadas en la misma generación, dentro de su propia familia).

Sin que resulte sorprendente, las encuestas demuestran que, poco después de conocer el resultado del test, las tendencias depresivas son más acusadas entre los sujetos con resultado positivo que entre los de resultado negativo. Hasta el momento, no se ha producido ningún suicidio entre las personas con un test de predicción positivo. La totalidad de los estudios destaca el papel importante que desempeña todo el conjunto en la decisión de la práctica del test, ya que esto condiciona también su propio futuro.

En nuestro experimento en Reims, entre las personas de riesgo primario o secundario,* sólo un pequeño porcentaje de los demandantes iniciales (16 %) pidieron efectivamente los resultados de su test presintomático. Por otra parte, un comportamiento idéntico aparece en todos los países en donde se ha propuesto esta modalidad de diagnóstico. Parece, pues, que estos pacientes, a pesar de que su primera intención fue mostrarse interesados (para su propia información personal y para la conducta a seguir con vistas a generaciones futuras) en la obtención de resultados, sólo muy parcialmente aprovechan la información que se pone a su disposición. Evidentemente, se produce una gran retracción entre el momento en que solicitaron el test (con la donación de sangre para la extracción de DNA) y el de pedir los resultados que saben disponibles. Este tipo de comportamiento —en el que la decisión final es exclusivamente de los pacientes— hace que aparezcan muy lejanas las perspectivas de erradicación de la enfermedad, unas perspectivas que la posibilidad de realización del test presintomático permitiría contemplar.

G.L. y J.-C. T. ■

## BALANCE DE UNA EXPERIENCIA

En Reims, hacemos el seguimiento de ciento nueve familias independientes de corea de Huntington: una tercera parte de ellas proceden de la región Champagne-Ardennes, mientras que las otras son originarias del resto del territorio francés.

En estas ciento nueve familias, hemos hecho tomas de sangre sobre un total de quinientos treinta y siete individuos, con posterior extracción del DNA correspondiente (este estudio se inició hace doce años en el marco de una encuesta médico-científica entre estas familias).

Entre los individuos a los que se practicó extracción sanguínea, ciento uno correspondían a pacientes sintomáticos: el análisis del número de tripletas estaba destinado a confirmar el diagnóstico clínico.

Este análisis se llevó a cabo en ciento ochenta y dos personas de riesgo primario o secundario. Los resultados del test presintomático sólo se entregaron a cuarenta y cinco de ellas (es decir, únicamente el 16 % del conjunto de los solicitantes iniciales).

Entre estas cuarenta y cinco personas, dieciocho tienen un valor de las tripletas superior o igual a cuarenta y, por tanto, dieron un test positivo. A petición propia, facilitamos a la mayor parte de ellas una estimación del plazo que transcurriría antes de la aparición de los primeros síntomas de la enfermedad.

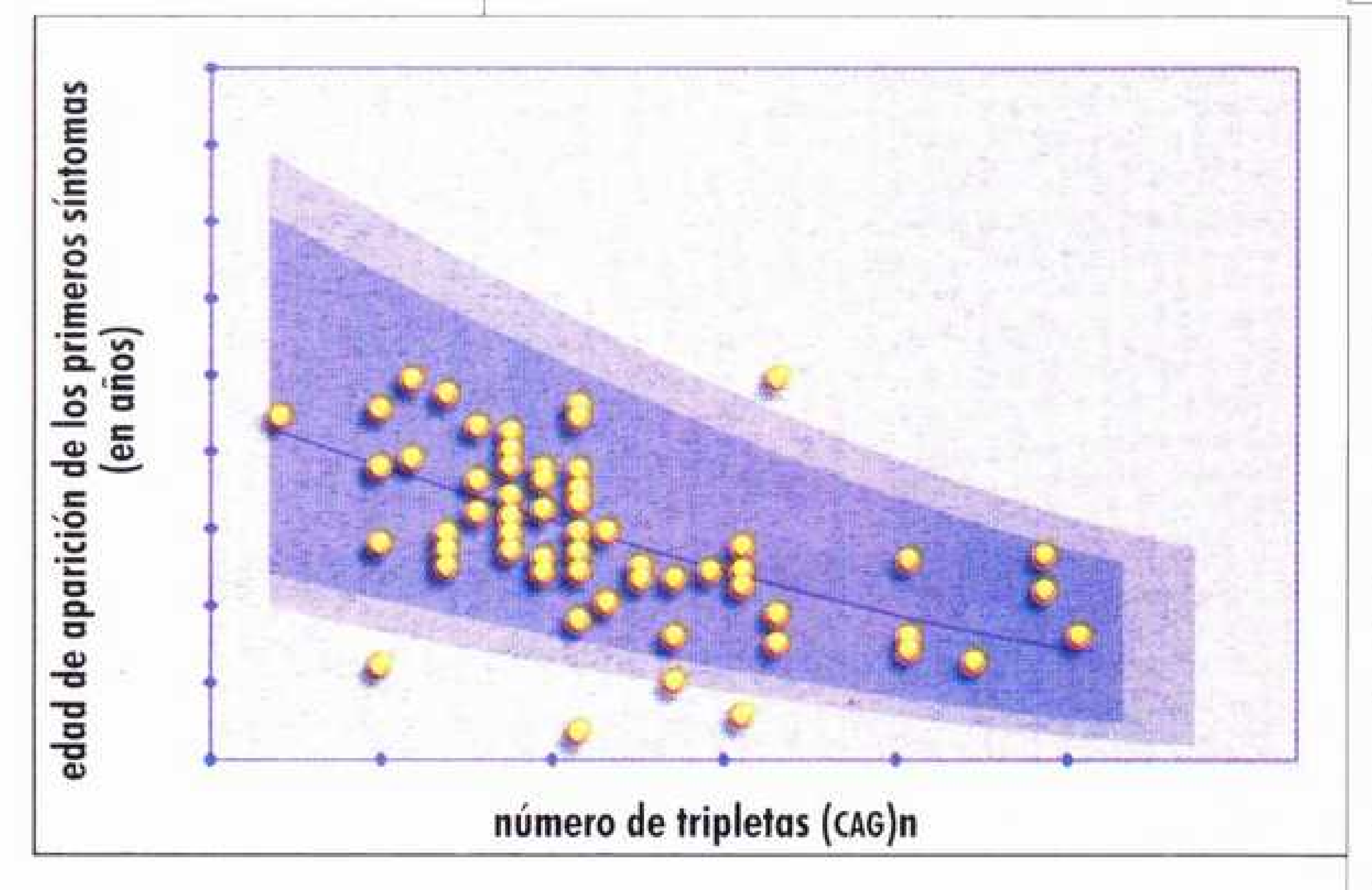



*Figura 1.* ***Esta curva (establecida sobre 72 pacientes) pone de manifiesto una relación inversa*** *entre el número de tripletas CAG y la edad de aparición de los primeros síntomas de la enfermedad. Cuanto más elevado es su número, más pronto aparecen los síntomas (las formas precoces de la enfermedad, sobre todo infantiles, se caracterizan por una gran cantidad de tripletas, que pueden alcanzar, e incluso sobrepasar, el centenar). Este conocimiento del número de tripletas permite prever con una seguridad relativamente buena la fecha de aparición de los primeros signos en el paciente considerado (las dos curvas a uno y otro lado de la curva media dan, respectivamente, los intervalos de confianza, con unos umbrales del 90 % y 95 %). (Según Lucotte* et al., *Hum. Genet., 95, 231, 1995.)*

(3) International Huntington Association and World Federation of Neurology, *Neurology*, 44, 1.533, 1994.
(4) C.M. Benjamin et al., *Am. J. Hum. Genet.*, 55, 606, 1994.
(5) M. Decruyenaere et al., *Genetic counseling*, 6, 1, 1995.

Yoshiko Okubo

# JAPÓN APUESTA POR LA INVESTIGACIÓN FUNDAMENTAL

## Más investigadores que en los cuatro grandes países europeos juntos

**YOSHIKO OKUBO**
The European Institute of Japanese Studies, Stockholm, School of Economics, Estocolmo, Suecia.

**La recesión no ha impedido que las empresas y el sector público japoneses inviertan masivamente en investigación fundamental. El último síntoma de esta tendencia, el plan quinquenal actualmente en discusión, maneja la colosal suma de 17.000 millones de yens (unos 20.000 millones de pesetas) y da fe de una voluntad renovada. Los frutos de este esfuerzo se han dejado sentir, pues Japón se está imponiendo poco a poco como la segunda potencia científica del mundo. Una importante reforma universitaria debe apoyar el movimiento.**

El nivel tecnológico de Japón podría llevar a suponer que los éxitos en lo tocante a innovación no necesariamente dependen del esfuerzo realizado en investigación fundamental. En cualquier caso, hay que constatar que actualmente Japón apuesta por la investigación fundamental.

Este impulso se inició claramente en 1984. Las orientaciones básicas fueron formuladas entonces por el Consejo de Ciencia y Tecnología (CCT) encargado de definir las líneas maestras de la política científica nacional.[1] Ya en 1971, el gobierno se había trazado el objetivo de llevar los gastos de I+D del 2 % al 2,5 % de la renta nacional, que es el promedio de los países avanzados. Desde entonces, los presupuestos públicos destinados a la investigación han aumentado regularmente y las empresas que hacen investigación han recibido tratos preferentes. El objetivo fijado en 1971 fue alcanzado en 1981 (el 2,56 % del producto nacional).

Paralelamente, el número de científicos formados en investigación se cuadruplicó entre 1965 y 1992. Actualmente los científicos e ingenieros investigadores son más numerosos que sus homólogos británicos, franceses, alemanes e italianos juntos y representan más de una cuarta parte de los efectivos de los veinticinco países de la OCDE.[2]

La nueva política se ha traducido en la creación de programas internacionales ambiciosos, como Ordenadores de quinta generación y *Human Frontier* (HFSP),[3] unas iniciativas en relación con las cuales, todo hay que decirlo, «la comunidad internacional no ha manifestado un interés desbordante».[4]

Los años 1980 permitieron también descubrir sus carencias en la escena científica. La lengua y la geografía fueron presentadas como los obstáculos principales, pero la modestia de los medios de acogida a los científicos extranjeros.[5] De todas formas, los temores surgidos en Occidente tras el anuncio del programa Ordenadores de quinta generación eran infundados. Después de 10 años de investigación y más de 400 millones de dólares de inversión, el programa se ha quedado lejos de los objetivos. Ha influido mucho en el desenlace la falta de un sistema de evaluación exterior.[6]

El programa *Human Frontier*, por su parte, es una tentativa ambiciosa para fomentar el desarrollo de la investigación en biología y biomedicina. Pero los tres primeros años han estado marcados por malentendidos entre su secretario general y el gobierno japonés, deseoso de no dar la impresión de querer jugar un papel dominante en el comité de dirección.[7]

El potencial científico japonés ha sido objeto de frecuentes evaluaciones exteriores, que han puesto de relieve el papel dominante del sector privado en la financiación de la I+D, y por lo tanto el supuesto privilegio de que goza la investigación aplicada. Pero estas evaluaciones también han mostrado una cierta falta de creatividad en ciencias fundamentales. Los japoneses han podido así tomar conciencia de los tópicos que circulan sobre ellos en Occidente: «Los japoneses sólo hacen tecnología, basada en nuestra investigación fundamental». Y ello pese a un cierto número de análisis más positivos publicados desde comienzos de siglo.[8]

Los años 1990 han permitido a Japón descubrir la necesidad de valorar mejor la posición que ocupa en el sistema de producción científica internacional. La Agencia para la ciencia y la tecnología (AST) ha elaborado un sistema especial de indicadores (*Japanese Science Indicator System*).[9] A tal exclusivo objeto se ha creado un instituto: el Instituto nacional de política de la ciencia y la tecnología. El ministerio de Educación, Ciencia y Cultura (Monbusho), que también está involucrado en el trabajo, publicó en 1987 un *Estudio comparativo de las publicaciones científicas*. Por su parte, el ministerio de Comercio internacional e industria (MITI) publicó en 1989 *Los Indicadores sobre la evolución de la I+D en Japón*. El análisis del banco de datos internacional *Science Citation Index* (SCI), con base en Filadelfia, permite ilustrar la creciente contribución del país a la producción de publicaciones reconocidas por la comunidad científica internacional, que ha pasado del 6,8 % en 1981 al 8,5 % diez años después. Con más de 45.000 publicaciones en 1992, Japón se ha convertido en el segundo productor mundial de ciencia, tras Estados Unidos.

**En los años 1980, Japón logró evaluar mejor su posición en la producción científica internacional**

Encabezan los porcentajes medios de estos diez años la química, con el 10,8 %, la ingeniería (10,5 %) y la física (9 %). Les siguen la biología, las ciencias biomédicas y la medicina clínica, que están creciendo con regularidad (fig. 1). Cierran la lista las ciencias de la Tierra y del espacio y las matemáticas. Teniendo en cuenta los datos del decenio anterior, este progreso de las ciencias de la vida es sorprendente. En 1973, más del 45 % de los artículos de la base SCI publicados por los japoneses correspondían a la física o la química.[10] Diez años después, esta proporción bajaba al 35 %. Se trata de una rápida evolución, característica de los países jóvenes: durante el mismo periodo el perfil de los demás países del G7 daba muestras de una notable inercia.

Un análisis más fino, que abarca dieciocho disciplinas, ha permitido constatar el mantenimiento de un fuerte avance en farmacología, una fuerte pro-

(Sigue en la Pág. 36)

(1) *Reccomendation of the Council for Science and Technology on the 11th Inquiry, Comprehensive Fundamental Policy for Promotion of Science and Technology to Focus Current Changing Situations from the Long Term View*; Consejo de ciencia y tecnología de Japón, 27 de noviembre, 1984.
(2) OCDE en cifras, *Statistiques sur les pays membres*, OCDE, París, 1995.
(3) K. Suzuki, «Japanese Government Programs Promote Internationalism», en *Science in Japan*, Westview Press. Inc, 135, 1989.
(4) «Recherche et développement au Japon», *Futuribles*, 127, 63, 1988.
(5) «Globalization of Scientific and Technological Activities and Issues Japan in Encountering», *Libro Blanco*, 1991, Agencia de ciencia y tecnología, Tokyo, 75, 1992.
(6) D. Swinbanks, *Nature*, 356, 273, 1992.
(7) A. Wada, *Nature*, 357, 356, 1992; D. Swinbanks; A. Abbott, *Nature*, 359, 567, 1992.

# EL I+D JAPONÉS EN NE

**1. proporción de las publicaciones japonesas**

% Japón/mundo

ingeniería
química
física
medicina clínica
biología
ciencias biomédicas
matemáticas
Tierra y espacio

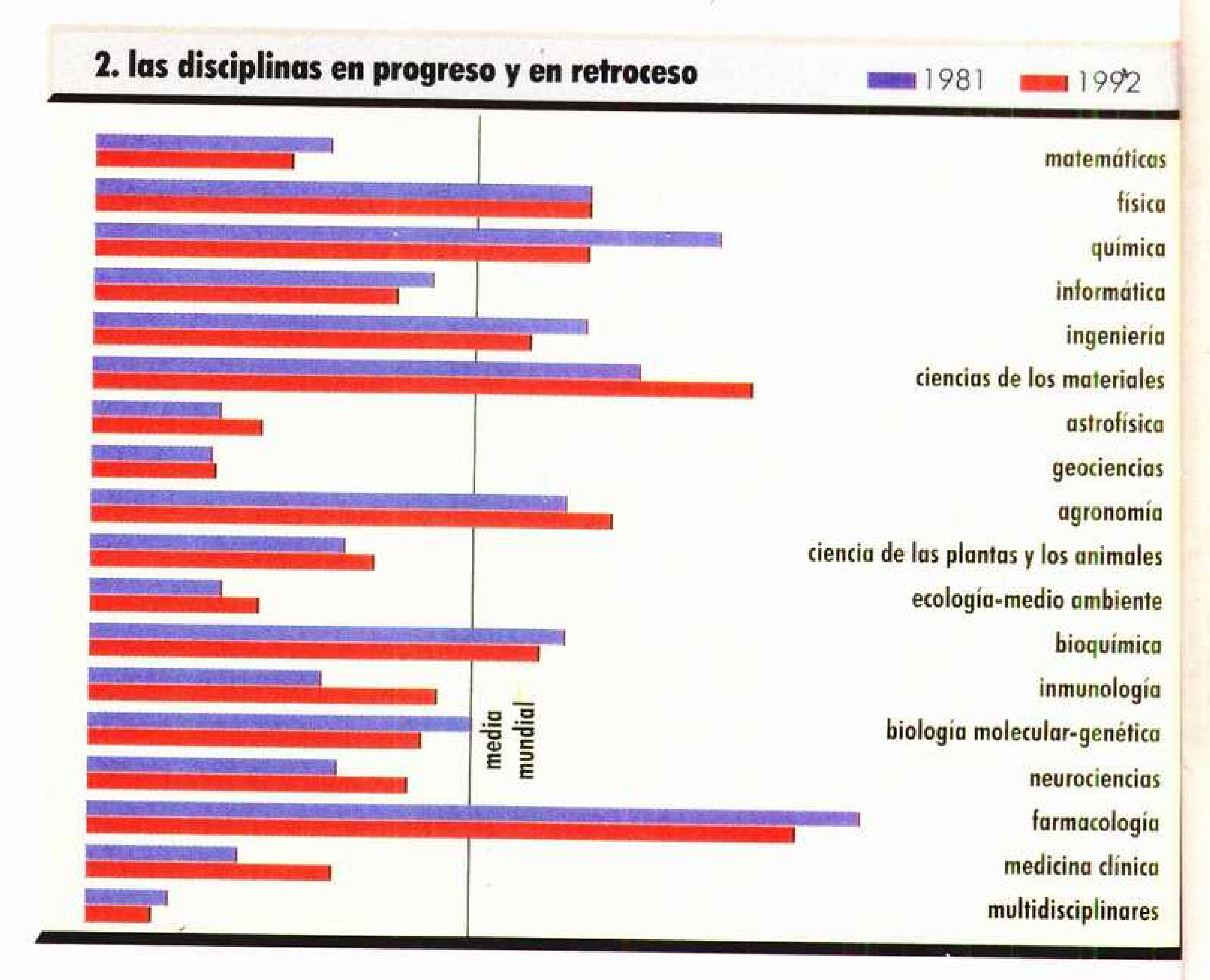
10
5

1981 1982 1983 1984 1985 1986 1987 1988 1989 1990 1991 1992

*Figura 1.*
*Evolución de la proporción de publicaciones japonesas en la base de datos internacional SCI (Science Citation Index), 1981-1992. (Fuente NSF 1993 y 1996.)*

*Figura 2.*
*Evolución de la posición que ocupa Japón en el conjunto de las publicaciones científicas mundiales, disciplina por disciplina, de 1981 a 1992.*
*La línea vertical indica la media mundial (48 países representan el 97,9 % de la producción científica mundial). (Fuente Ecole centrale de Paris-S&T.)*

**2. las disciplinas en progreso y en retroceso**




**3. los puntos fuertes de tres países**

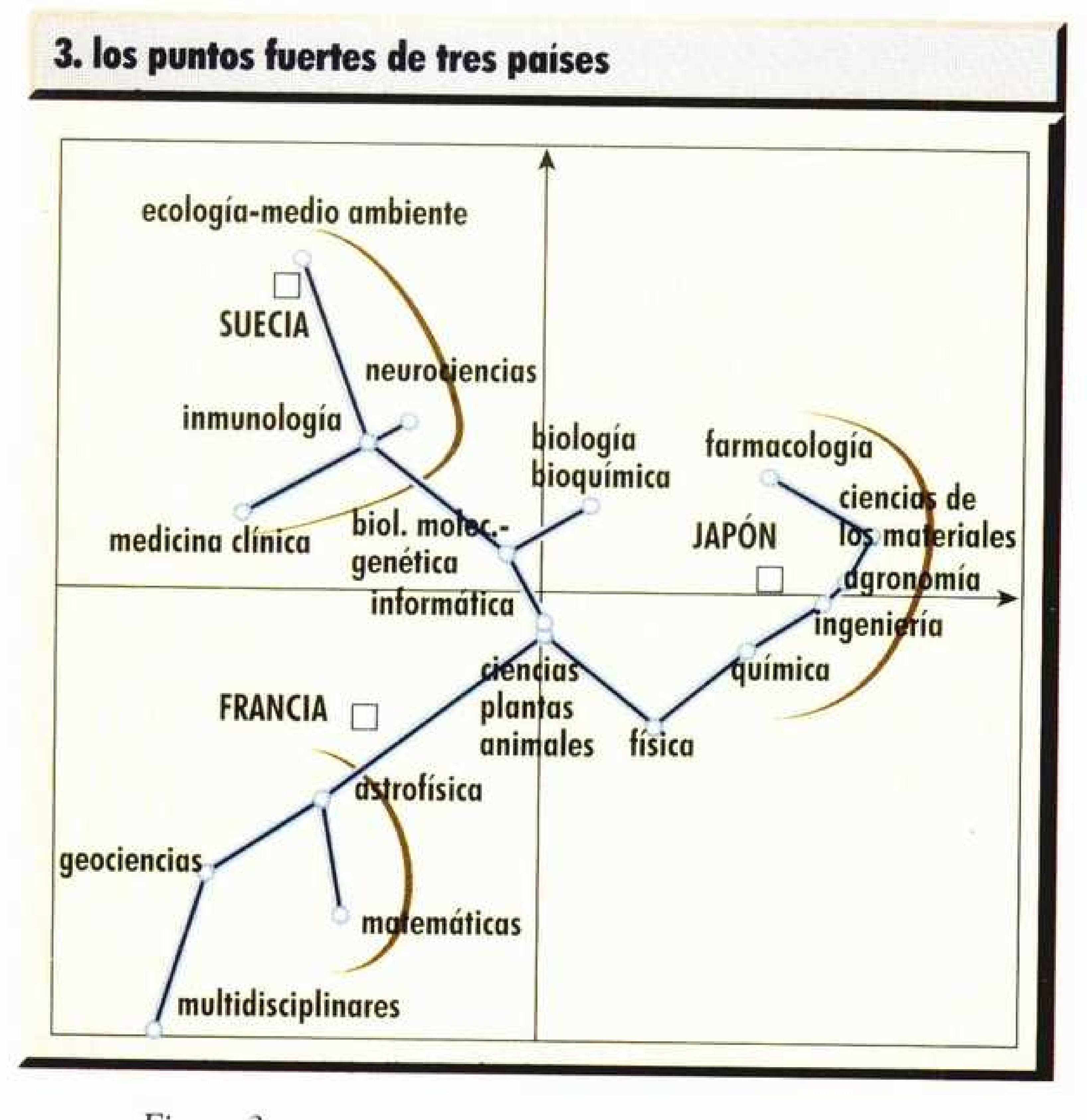
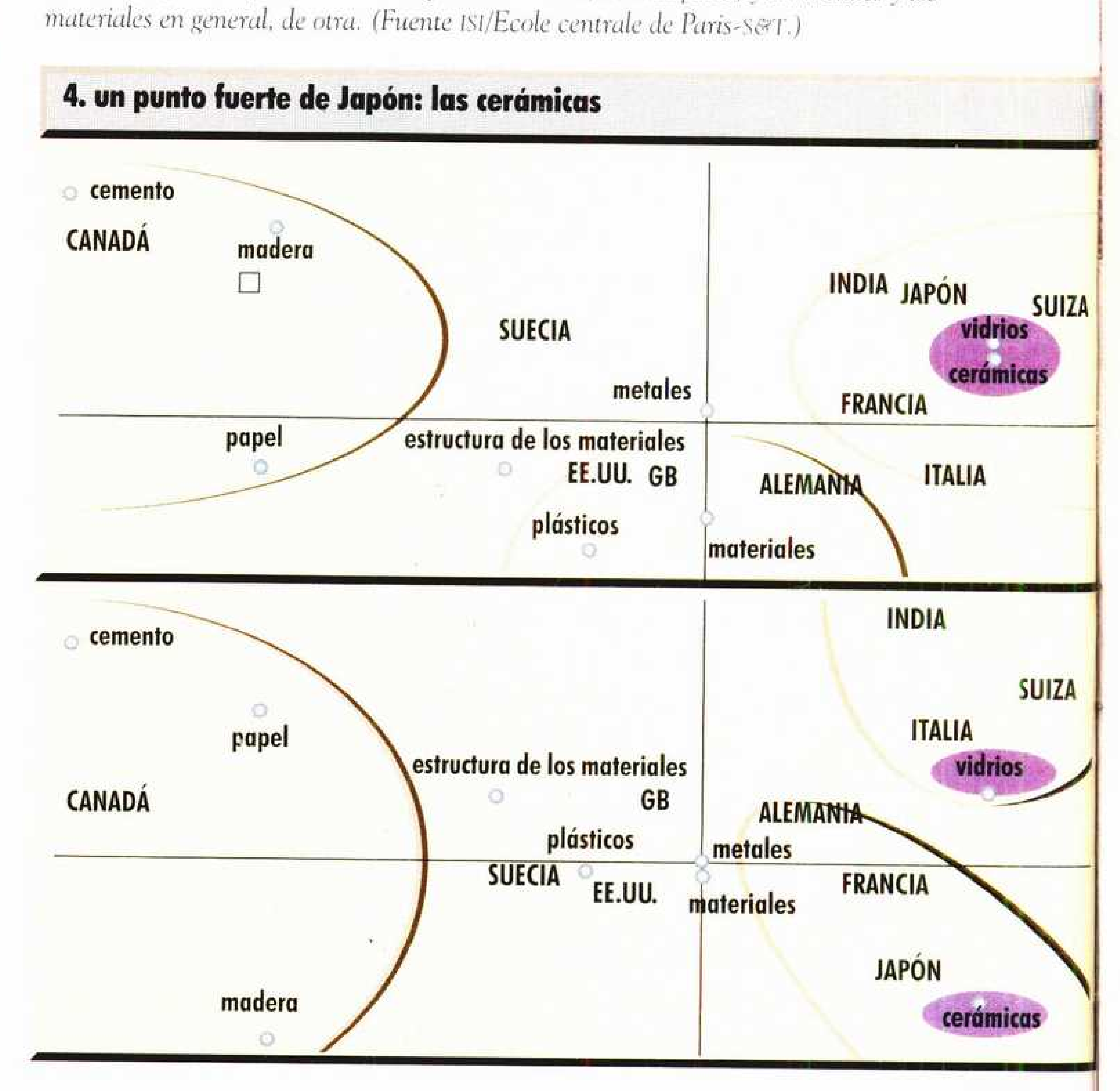



*Figura 3.*
*Una red de proximidad ilustra la preeminencia relativa de Japón, Suecia y Francia en dieciocho disciplinas. El análisis está basado en el número de publicaciones científicas entre 1981 y 1992. (Véase: J.-C. Doré, T. Ojasoo, Y. Okubo, T. Durand, G. Dudognon, J.F. Miquel, Correspondence Factorial Analysis of the Publication Patterns of 48 Countries over the Period 1981-1992, Journal of American Society for Information Science, 47(8), 588-602, 1996.)*
*(Fuente SCI 81-92- Ecole centrale de Paris-S&T.)*

*Figura 4.*
*La técnica utilizada en la figura 3 se aplica aquí a diez países y nueve palabras clave tomadas del campo de los materiales en 1992. Se obtienen mapas distintos (a y b) según que se agrupen o separen los vidrios y las cerámicas, de una parte, y los metales y los materiales en general, de otra. (Fuente ISI/Ecole centrale de Paris-S&T.)*

**4. un punto fuerte de Japón: las cerámicas**



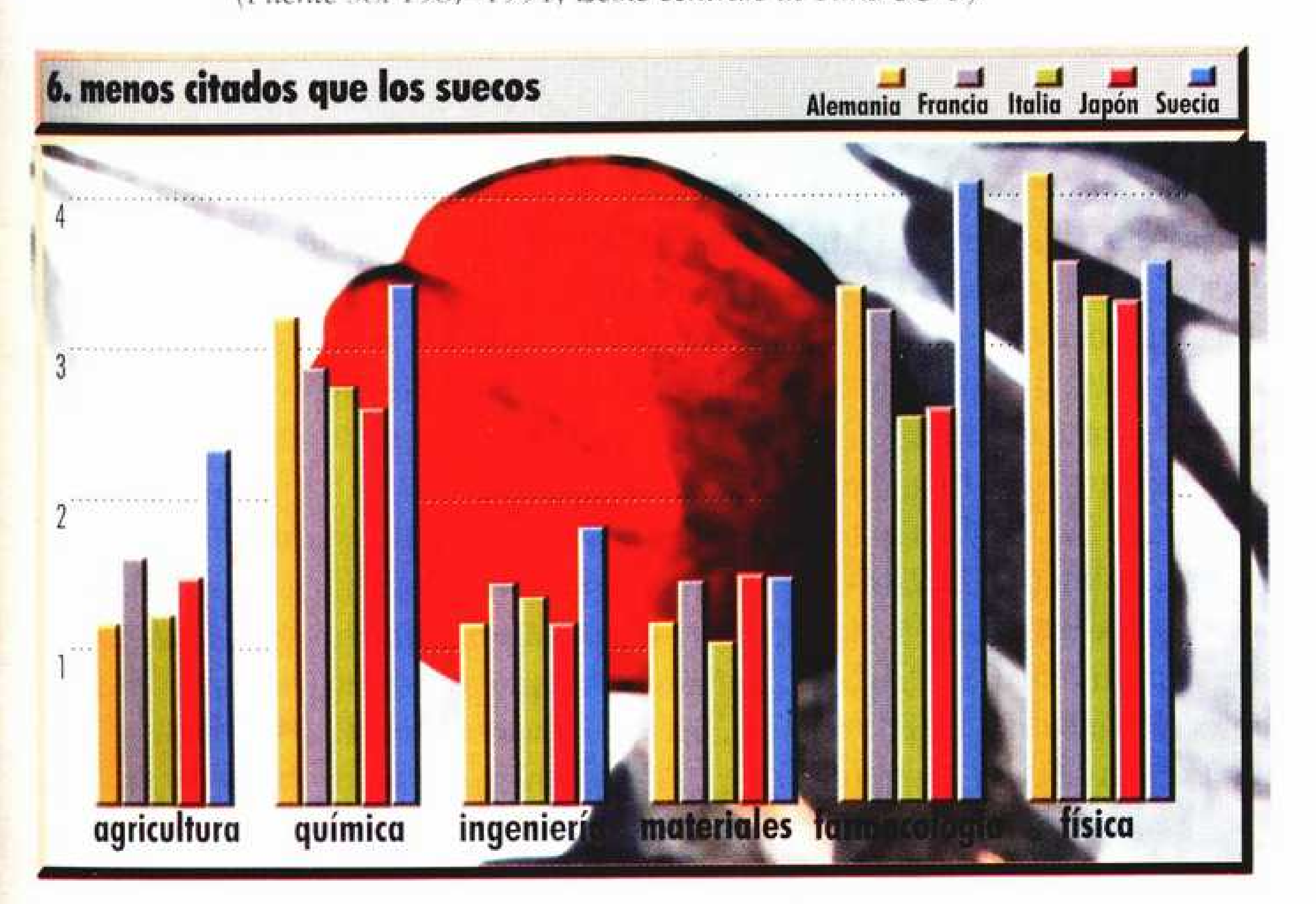
# UEVE CUADROS

**5. una sensación de retraso con respecto a los norteamericanos**

| Campos | Temas de investigación | Japón/EE.UU. | Japón/Europa |
|---|---|---|---|
| Ciencias de la vida | Mecanismo de control de la expresión de los genes. | EE.UU. | = |
| | Procesos de crecimiento y de envejecimiento. | EE.UU. | Europa |
| | Funciones cerebrales. | EE.UU. | Europa |
| Ciencias de los materiales | Fenómenos de superficie y de interfase de materiales. | EE.UU. | = |
| | Creación de nuevos materiales por control de su estructura cristalina. | = | Japón |
| | Métodos teóricos de diseño de materiales. | EE.UU. | = |
| Ciencias de la información y Electrónica | Creación de sistemas funcionales controlados al nivel molecular y atómico. | = | Japón |
| | Tratamiento de datos en los modos paralelo y superdistribuido. | EE.UU. | = |
| | Extracción de informaciones semánticas a partir de datos audiovisuales. | = | = |
| Tierra y océano | Circulación global de los océanos, interacción atmósfera-océano. | EE.UU. | = |
| | Sistemas ecológicos oceánicos. | EE.UU. | = |
| | Cambios a largo plazo de la temperatura del aire por control del dióxido de carbono, el nitrógeno, etc. | EE.UU. | = |

*Figura 5. Resultado de una encuesta realizada en 1991 a investigadores e ingenieros japoneses ( = significa nivel equivalente). (Fuente AST.)*

*Figura 6. Número medio de citas por publicación, 1988-1992. (Fuente SCI 1987-1991, Ecole centrale de Paris-S&T.)*




**7. proporción de publicaciones científicas japonesas**

| Ciencias «duras» | 1981 | 1992 | diferencia |
|---|---|---|---|
| Física | 14,02 % | 16,85 % | +2,83 |
| Materiales | 4,07 % | 5,48 % | +1,41 |
| Informática | 0,90 % | 0,99 % | +0,09 |
| Ingeniería | 7,08 % | 6,76 % | -0,32 |
| Química | 22,39 % | 16,08 % | -6,31 |
| Total | 48,46% | 46,16 % | |
| **Ciencias de la vida** | | | |
| Medicina clínica | 7,36 % | 11,66 % | +4,30 |
| Neurociencias | 2,01 % | 3,05 % | +1,04 |
| Inmunología | 0,97 % | 1,77 % | +0,80 |
| Biología/bioquímica | 16,91 % | 15,68 % | -1,23 |
| Ecología/medio ambiente | 0,68 % | 0,87 % | +0,19 |
| Biología molec./genética | 4,32 % | 4,54 % | +0,22 |
| Agronomía | 4,50 % | 3,32 % | -1,18 |
| Plantas/animales | 5,15 % | 4,85 % | -0,30 |
| Farmacología | 6,56 % | 5,48 % | -1,08 |
| Total | 48,46 % | 51,16 % | |

*Figura 7. Fuerte avance en física y medicina, claro retroceso en química.*

**8. el progreso en ciencias de la vida**

| 1981 | |
|---|---|
| Neurociencias | EE.UU. GB CAN |
| Inmunología | EE.UU. GB FRA |
| Biología molecular-genética | EE.UU. GB JPN |
| Medicina clínica | EE.UU. GB FRA CAN ITA |
| **1992** | |
| Neurociencias | EE.UU. GB |
| Inmunología | EE.UU. GB |
| Biología molecular-genética | EE.UU. GB |
| Medicina clínica | EE.UU. GB FRA |

*Figura 8. En las clasificaciones, Japón va asentándose poco a poco en el tercer lugar, por delante de Francia.*

**9. publicaciones de empresas** (en %)

| | 1986 | 1990 | 1994 |
|---|---|---|---|
| Toshiba | 0,47 | 0,64 | 0,64 |
| Canon | 0,04 | 0,05 | 0,05 |
| Matsushita Elect. | 0,23 | 0,47 | 0,37 |
| Sony | 0,14 | 0,18 | 0,20 |
| Fujitsu | 0,36 | 0,51 | 0,39 |
| Hitachi | 1,12 | 1,38 | 1,26 |
| NEC | 0,35 | 0,52 | 0,66 |
| Total | 2,71 | 3,75 | 3,57 |
| IBM (EE.UU.) | 0,56 | 0,83 | 0,59 |
| Thomson (Francia) | 0,31 | 0,40 | 0,45 |
| Philips (Países Bajos) | 1,98 | 3,32 | 2,05 |

*Figura 9. Contribución de las empresas al total de las publicaciones científicas del país. (Fuente SCI.)*

gresión del avance en ciencias de los materiales, un mantenimiento del avance en física, agronomía y bioquímica, una reducción del avance en química y un leve descenso del avance en ingeniería (fig. 2).[11] El retraso tiende a reducirse en inmunología y medicina clínica.

El punto más débil sigue correspondiendo a la matemática, que ha visto cómo su posición seguía bajando pese a un aumento de la producción de artículos (trescientos noventa y ocho en 1981, ciento treinta y seis en 1992). La informática no ocupa la posición que cabría imaginar, posiblemente porque ha penetrado poco en el medio universitario y ha sido objeto de menos publicaciones que en otros ámbitos.

Ponderando los datos de la base SCI para estas dieciocho disciplinas, se puede comparar el perfil de Japón con el de otros países. Nosotros lo hemos hecho para Francia y Suecia (fig. 3). Se ve que Francia, en comparación, es fuerte en astrofísica, geociencias y matemáticas; Suecia lo es en ecología/medio ambiente, inmunología, neurociencias y medicina clínica. El mismo tipo de análisis muestra la preeminencia de los países anglosajones y escandinavos en las ciencias de la vida. Utilizando diez palabras clave que caracterizan la investigación sobre materiales, hemos posicionado diez países según sus ejes de competencia (fig. 4). Se constata, por ejemplo, que Japón se distingue en la investigación sobre cerámicas.

¿Cómo perciben los investigadores japoneses su lugar en la competición mundial? Un cuestionario elaborado por la AST ha mostrado que en 1991 los Estados Unidos eran considerados superiores en nueve subdominios de la investigación fundamental sobre doce mencionados (fig. 5).[12] El dominio norteamericano se percibía como especialmente intenso en ciencias de la vida y en ciencias del océano y de la Tierra. Europa occidental también era considerada superior en ciencias de la vida. Los investigadores japoneses se sentían globalmente competitivos en ciencias de los materiales, informática y electrónica. Adviértase a pesar de todo la aprobación dada al subdominio «Identificación de los mecanismos de control de la expresión genética».

Otro índice clásicamente explotado: el número de artículos citados como referencia en otros artículos. El peso de Japón creció más que el de cualquier otro país entre 1973 y 1982. El crecimiento fue especialmente intenso en investigación médica e ingeniería (83 % en la investigación biomédica, 83 % en clínica, 91 % en ingeniería).[13] A pesar de todo, los trabajos de los científicos japoneses todavía no gozan de gran reconocimiento por parte de la comunidad internacional. Incluso en campos privilegiados de la ciencia japonesa, el índice de citas es modesto. El índice medio de citas por publicación es mayor para Suecia (3,9), Alemania (3,3) y Francia (3,3) que para Japón, que se encuentra al nivel de Italia (2,9) (fig. 6). Sólo las ciencias de los materiales dan a los japoneses un índice de citas ligeramente superior al de los demás países no anglófonos.

Los japoneses han ido comprendiendo paulatinamente las reglas de acceso al reconocimiento internacional. No basta con publicar. Además, hay que poder y querer argumentar en una lengua extranjera, ser capaz de insistir, de ser intransigente en caso necesario, para hacer valer la coherencia del punto de vista propio. Ello implica una cultura de debate.

**Japón ha pasado del cuarto al tercer lugar mundial en lo tocante a neurociencias e inmunología, por delante de Francia y Canadá**

Si se observa la distribución de la producción entre las disciplinas en el ámbito nacional, se advierte que las ciencias de la vida superaron el 50 % en los años 1980. El retroceso relativo de las ciencias «duras» es esencialmente debido al de la química (fig. 7). Esta evolución concuerda con la constatación de que la posición relativa de Japón en la arena internacional más bien bajó durante este periodo en las ciencias duras y subió en las ciencias de la vida (fig. 2). Se trata de la evolución inversa de la tendencia global mundial, donde se advierte un ligero retroceso de las ciencias de la vida en provecho de las ciencias duras, que pasaron del 34 % en 1981 al 36 % en 1992.

Cuando se desglosa el detalle de los avances de la investigación japonesa en las ciencias de la vida, se constata el paso de la cuarta a la tercera posición mundial en neurociencias e inmunología, por delante de Francia y Canadá, pisando los talones a Gran Bretaña (fig. 8).

Recientemente, la base biomédica *Medline* ha establecido que algunas universidades japonesas (Osaka, Kyushu, Tokyo) producen cifras comparables a las mejores universidades norteamericanas (John Hopkins, Columbia, Cornell) y europeas (Oxford) en lo tocante a artículos publicados.[14] Esta evolución es debida en parte a la política emprendida por el Monbusho, que en 1982 puso en marcha un programa, llamado en inglés *Specially Promoted Distinguished Research* (SPDR), destinado a favorecer la competencia interuniversitaria sobre temas definidos por el ministerio. Veintidós de los cuarenta y ocho proyectos seleccionados entre 1982 y 1986 al término de una severa competencia tenían que ver con las ciencias de la vida.

En ingeniería genética, el Monbusho dictó las líneas maestras en 1979 y el gobierno concedió subvenciones para estimular la investigación. La creación, en 1977, de los institutos Okazaki de



***Este experimento de manipulación** virtual de un Mokoshi (templo portátil tradicional) tiene lugar en el ATR* (Advanced Telecommunications Research International Institute), *Kansai Science City, cerca de Kyoto.*


(8)
J. Boyer, «L'exposition japonaise d'Osaka en 1903», *La Nature*, 1.595, 33, 1903.

(9)
F. Kodama, F. Niwa, *The Journal of Science Policy and Research Management* 2 (2), 173, 1987.

(10)
F. Narin, D. Frame, *Science*, 245, 600, 1989.

(11)
J.F. Miquel, T. Ojasco, Y. Okubo et al., *Scientometrics* 33 (2), 149, 1995.

(12)
«Survey of the High Tech Researchers and Engineers FY 1988 and FY 1991», Libro Blanco 1991, Tokyo, 1992.

(13)
J. Irvine, B. Martin, *Nature*, 316, 587, 1985.

(14)
S. Yamazaki, *Nature*, 372, 125-126, 1994.

investigación nacional y, en 1984, del instituto Riken de Tsukuba, contribuyó también al crecimiento de este sector.[15] Estos institutos figuran actualmente entre los organismos más citados por publicación y entre los más productivos por investigador en Japón.[16] Han surgido múltiples iniciativas ministeriales en el mismo sentido: programas elaborados por la AST, el MITI, el ministerio de agricultura y el de Sanidad. En un estudio realizado en 1990 con objeto de identificar las producciones más significativas del desarrollo de la investigación entre 1980 y 1989, el instituto para la información científica (ISI) elaboró un *hit-parade* de los diez trabajos más citados de los años 1980.[17] Dos de los tres japoneses que encabezaban la lista estaban especializados en ciencias de la vida.

Otra novedad de los años 1980 consiste en que los industriales aumentaron considerablemente sus inversiones en la investigación fundamental. Se crearon muchos nuevos laboratorios, incluso fuera del archipiélago. El porcentaje de gastos nacionales en I+D financiados por las empresas pasó del 59 % en 1965 al 75 % en 1992.

**Durante el pasado decenio, el presupuesto industrial dedicado a la investigación fundamental se multiplicó por 3,8**

Otro índice: el 66 % del personal de investigación está en la industria privada. Se contabilizan más de ocho empleos en investigación por cada mil asalariados (en 1990), la tasa más elevada de los países del G7. Por último, el presupuesto industrial asignado a la investigación fundamental se multiplicó por 3,8 entre 1980 y 1990.[18]

En muchas empresas, la inversión en I+D ha superado la inversión en capital. Analizando sesenta y ocho grupos industriales, el instituto de investigación Nomura constató una brusca inversión de la tendencia: mientras que en 1985 la inversión en capital era un 30 % mayor que la inversión en I+D, tres años después se había vuelto inferior en un 8 %.[19] «En vez de un lugar de producción, las empresas industriales se están convirtiendo en un lugar de reflexión y creación», se ha llegado a escribir.[20] El impacto del fenómeno es considerable porque para el conjunto de la economía japonesa la inversión en I+D ha igualado recientemente la inversión en capital. Por otra parte, a finales de los años 1980 surgió una nueva clase de instituciones bien dotadas. Se trata de laboratorios, creados por industriales y por el Estado, destinados a promover la colaboración entre los industriales y la universidad. Su presupuesto ha sido fijado por un periodo de diez años, lo cual les ha permitido resistir la recesión.

Los industriales también han incrementado su visibilidad científica. Las siete firmas niponas que figuraron entre los veinte primeros registradores de patentes en Estados Unidos entre 1981 y 1990 también incrementaron el número de sus publicaciones científicas. La contribución de Toshiba al conjunto de las publicaciones japonesas pasó del 0,37 % en 1986 al 0,64 % en 1994 (fig. 9). Sorprende el hecho de que en el contexto desfavorable que se manifestó desde comienzos de los años 1990 las empresas protegieran su investigación fundamental.[21]

Lo mismo que el sector público, las empresas se han abierto a los investigadores extranjeros. Entre 1988 y 1991, el número de investigadores extranjeros se multiplicó por más de tres, pasando a un total de setencientos cincuenta.[22] En los laboratorios de investigación de las filiales japonesas en el extranjero, el número de investigadores contratados localmente rebasa el de investigadores japoneses.

El principal motivo de inquietud para los responsables de la I+D japonesa consiste actualmente en el riesgo de una penuria de mano de obra científica a partir de principios del siglo XXI. La AST prevé que de aquí al año 2005 Japón sólo podrá movilizar la mitad de la mano de obra necesaria para su investigación científica. Actualmente, dos millones de japoneses tienen 18 años. Este número pasará a 1,5 millones en el año 2000 y a 1,2 millones en torno a 2010. Se trata de una reducción mucho más severa que en Estados Unidos y Europa. Simultáneamente, el interés de los jóvenes por la ciencia no cesa de disminuir: la nueva generación se aleja de la investigación científica. Los dirigentes japoneses son conscientes de la necesidad de tomar medidas.

Los japoneses raramente prosiguen sus estudios hasta el doctorado. La tasa de estudiantes de doctorado por mil habitantes es de 0,7, por 7,1 en Estados Unidos, 2,9 en Francia y 2,2 en Gran Bretaña.[23] Sólo el 5% de los estudiantes prosiguen su formación universitaria hasta el doctorado. Estas proporciones no han cambiado desde 1960. Por ello, el ministerio de Educación ha puesto en marcha una importante reforma de la enseñanza superior.[24]

Otro problema no menos importante consiste en la tendencia de las empresas a contratar a jóvenes lo más pronto posible, desde finales del segundo ciclo universitario (nivel de «master») o en todo caso antes del doctorado, a fin de adaptarlos a las condiciones específicas de su propia investigación.

Tradicionalmente es la primera parte de la formación universitaria la que atrae la mayoría de los créditos. La reforma en curso trata de dar una importancia mayor al master concediéndole más medios y estableciendo un estrecho vínculo entre esta formación y la investigación. Se pretende doblar el número de estudiantes de doctorado entre 1990 y el año 2000.

Otro eje de la reforma: el reforzamiento de la competencia dentro de la investigación universitaria a través de la institución de un verdadero sistema de evaluación que recurra a expertos exteriores. Está claro que la falta de un sistema de evaluación objetiva alienta las rigideces de la administración tradicional. Se exige una nueva cultura de la evaluación, que tardará en imponerse. Dos elementos nuevos al respecto: el Estado incrementará sensiblemente el número de proyectos de investigación concedidos por concurso de ofertas; los criterios serán más transparentes; los responsables de los proyectos no seleccionados tienen ya acceso al informe de evaluación.

Otra intención declarada consiste en invertir el flujo de los investigadores. Japón debe convertirse en un polo de atracción no sólo para los científicos nacionales, que a menudo han tenido la tentación de expatriarse, sino también para los investigadores del mundo entero. En esa dirección hay que interpretar la posibilidad dada desde 1992 a laboratorios nacionales no universitarios de convertirse en *Centers of Excellence* (COE), que reciben fuertes subvenciones a cambio de demostrar su capacidad para contribuir a la ciencia mundial.

Paralelamente, la remuneración y la calidad de la acogida dada a los investigadores extranjeros han mejorado tanto en el sector público como en el empresarial. Los organismos gubernamentales ofrecen ahora becas postdoctorales a los extranjeros, con la esperanza de permitir una apertura y de suavizar los desequilibrios de los intercambios. Se ha admitido la participación de los extranjeros en programas nacionales, con la idea de favorecer ideas heterogéneas.

En resumen, Japón está creando un nuevo ambiente, más próximo a las normas vigentes en los llamados países avanzados. Pero el país hace su propia revolución al revés que Europa: en ésta, la ciencia y la legitimidad de la investigación fundamental precedieron las ambiciones de la revolución industrial; en Japón, las ambiciones tecnológicas precedieron la investigación fundamental.

**Y.O. ■**

***Para más información***

■ Y. Okubo, *Un regard sur la science et les technologies japonaises*, ESKA, a publicar.

**(15)** «Medical and Life Science», *in* «Historical Review of Japanese Science & Technology Policy», *The Commission on the History of Science and Technology Policy*, Tokyo, 309, 1991.

**(16)** *Science*, 258, 565, 1992.

**(17)** D. Pendlebury, *The Scientist*, 4, 1, 18-19, 1990.

**(18)** *Libro Blanco* 1982, Agencia de ciencia y tecnología, Tokyio, 1983; *Libro Blanco* 1992, Agencia de ciencia y tecnología, Tokyo, 1993.

**(19)** *The Economist*, 2, 3-18, de diciembre de 1989.

**(20)** F. Kodama, *Science and Public Policy*, 18(6), 385, 1991.

**(21)** J. Kinoshita, *Science*, 266, 1.170, 1994.

**(22)** D. Swinbanks, *Nature*, 362, 870, 1993.

**(23)** *Libro Blanco* 1991, ministerio de Educación, Ciencia y Cultura, Tokyo, 339, 1992.

**(24)** S. Yamamoto, *Problems and Reforms of Graduate Education in Japan*, ASHE Conference Internationale, Tucson Arizona, 8 de noviembre de 1994.

# LA LUMINOSA DEFENSA DE LAS PLANTAS

Suzanne Féry-Forgues

## Plaguicidas de síntesis que imitan las fototoxinas naturales

**SUZANNE FÉRY-FORGUES** es encargada de investigación en el CNRS, laboratorio de las interacciones moleculares, reactividad química y fotoquímica, de la Universidad Paul-Sabatier de Toulouse.

Para ciertas plantas, el Sol no es solamente una fuente de energía. Su luz es también como un precioso aliado contra los agresores: la naturaleza ha dotado a estas plantas de la capacidad de producir moléculas que, una vez ingeridas por un herbívoro o un insecto, adquieren un poder tóxico cuando son activadas por la luz. ¿Sabrán inspirarse los agroquímicos en estas fototoxinas para la puesta a punto de una nueva generación de plaguicidas?



Entre todas las estrategias de defensa posibles, el mundo vegetal tiene preferencia por el veneno: las bellas venenosas son legión. Ciertas plantas aprovechan la energía solar para mejorar su arsenal químico: fabrican moléculas que, prácticamente inofensivas en la oscuridad, se convierten en nocivas bajo la acción de la luz. Cuando estas sustancias, llamadas fototoxinas, son ingeridas por un herbívoro o un insecto, los daños que provocan varían en función de la luz recibida y del tamaño del animal. En los herbívoros de gran tamaño, la luz no penetra mucho más allá de la dermis; las lesiones son superficiales y a menudo se limitan a severas lesiones cutáneas. En cambio, para los insectos atravesados en su totalidad o de manera importante por la radiación, las lesiones son a veces suficientes para provocar la muerte del agresor.

La fototoxicidad de ciertos vegetales es conocida desde hace mucho tiempo y, a veces, se ha aprovechado. Así, en 1636, Gérard alababa en su *Herbier* las preparaciones a base de corazoncillo (*Hypericum perforatum*) por tener el «color de la sangre», lo que lo convertía en «uno de los más preciosos remedios para las heridas profundas». Paralelamente, este mismo corazoncillo era conocido por causar la «enfermedad de la luz» al ganado que lo consumía, es decir, una grave inflamación de la piel que sólo mejoraba manteniendo a los animales en la oscuridad. El efecto antiséptico y la fotosensibilización se deben a la misma molécula, la hipericina, que se hace tóxica bajo iluminación.

Este amplio espectro de acción constituye una de las características de las fototoxinas, que, en presencia de luz, son altamente agresivas y carentes en absoluto de selectividad. Sin embargo, ciertos herbívoros logran alimentarse impunemente con plantas fototóxicas. Por ejemplo, para comer, ciertos insectos se esconden de la luz horadando túneles en el vegetal, envolviéndose en una hoja o alimentándose solamente por la noche. Otros desarrollan resistencias llamadas «fisiológicas», como la formación de una cutícula opaca o reflectante.

Actualmente, se ha aislado más de un centenar de fototoxinas que proceden de vegetales pertenecientes a treinta familias muy diferentes. Por tanto, se trata de un fenómeno bastante extendido. Como la estructura química de estas sustancias es muy variable, no es sorprendente que exista una amplia gama de mecanismos de acción. Sin embargo, la primera etapa es siempre la misma: la molécula absorbe un fotón y pasa a un estado excitado, inestable y de alta energía. Entonces, esta molécula activada puede actuar según dos grandes esquemas de evolución.

En el primer tipo de reacciones, la toxina se transforma directamente en el transcurso de la reacción fotoquímica. Los psoralenos* constituyen un buen ejemplo de estas reacciones directas: se difunden rápidamente hasta el núcleo de las células y se fijan en las hebras de DNA, a las que dañan de manera irreversible.

Pero la molécula también puede desempeñar un papel de catalizador fotoquímico, participando en la reacción sin quedar modificada al final del proceso. Estas reacciones de «fotosensibilización» se desarrollan en el medio vivo y, por tanto, en presencia de oxíge-

**PSORALENO**
Cada uno de los heterociclos trianulares derivados de la furocumarina.

no; dan como resultado productos de oxidación, a menudo en una forma activada del oxígeno, el oxígeno «singlet». A nivel de la célula, esto se traduce en una oxidación generalizada que altera o suprime la función biológica normal de las biomoléculas y, a menudo, conduce a la muerte celular. En efecto, con la excepción de los psoralenos, las fototoxinas vegetales funcionan esencialmente como catalizadores fotoquímicos.



*Los claveles de las Indias* (Tagetes patula) *se utilizan tradicionalmente para proteger las plantaciones contra el ataque de los insectos y los gusanos. Este efecto se debe a su pigmento amarillo, el alfa-tertienil, que es una fototoxina azufrada. (Foto Jacana.)*

OH O OH
$H_3C$ OH
$H_3C$ OH
OH O OH
**Hipericina**

O O O
**Psoraleno**

En el laboratorio hemos trabajado mucho sobre la fototoxicidad de ciertos medicamentos, y con frecuencia hemos observado reacciones directas en las que una molécula se transforma directamente bajo la acción de la luz en una sola molécula de derivado tóxico. En cambio, seguimos buscando una fototoxina vegetal de origen natural que se comporte así... Por tanto, la naturaleza ha dado preferencia a compuestos que transforman de manera catalítica cantidades importantes de oxígeno ordinario en agente de destrucción. A partir de una misma energía invertida para fabricar la fototoxina, esta argucia catalítica permite que la planta multiplique la eficacia del proceso.

**La principal familia de fotoplaguicidas desarrollados por la agroquímica altera la biosíntesis de la hemoglobina y de la clorofila**

Hubo que esperar hasta los años 1970 para que la agroquímica se interesase por las fototoxinas con el fin de elaborar nuevos plaguicidas. La industria agroquímica se orientó hacia las moléculas de síntesis que, por su estructura y su reactividad, son las que más se parecen a las fototoxinas naturales: los colorantes. Varias de ellas han dado buenos resultados como fotoplaguicidas, pero solamente se ha comercializado la eritrosina B. Este producto se utiliza como larvicida para regular las poblaciones de moscas en los gallineros industriales. Como la eficacia de los fotoplaguicidas depende de la iluminación, su empleo parece ser más indicado en un medio controlado, como un invernadero. Estos productos podrían presentar grandes ventajas, en primer lugar por su eficacia y, en segundo lugar, por su débil impacto sobre el medio ambiente. En efecto, se piensa que los fotoplaguicidas depositados alrededor de una planta únicamente son nocivos para los organismos que consumen esta planta e ingieren el producto al mismo tiempo. Los predadores de la planta serían los primeros en ser destruidos, mientras que los insectos benéficos o polinizadores quedarían indemnes. Por otra parte, los fotoplaguicidas se degradan lentamente bajo la acción de la luz, lo que reduce los problemas de contaminación.

De hecho, los agroquímicos se orientaron primero hacia los fotoplaguicidas de origen porfírico, que alteran la biosíntesis de la hemoglobina y de la clorofila. Contrariamente al enfoque habitual, que consiste en ensayar varias decenas de miles de productos químicos por año, estos fotoplaguicidas se han diseñado a partir del conocimiento previo de las vías metabólicas. Durante la biosíntesis de la clorofila y del hemo (principal constituyente de la hemoglobina), se forman, en general, numerosos intermediarios de alta potencia tóxica. Todos los animales, todas las plantas y la mayoría de microorganismos producen alguno de estos compuestos y llevan en sí mismos su propia destrucción por la luz. Pero la naturaleza ha desactivado esta bomba de retardo regulando su biosíntesis de manera muy estricta. La idea de base de los fotoplaguicidas es perturbar esta regulación para que en la célula se acumulen cantidades masivas de intermediarios. De esta manera, bajo iluminación, producirían grandes cantidades de oxígeno *singlet*, fatales para los organismos en cuestión.

Los primeros en desarrollar este enfoque fueron Constantin Rebeiz y su equipo, a partir de 1984, en la Universidad de Mississippi. Se esperaba que los herbicidas sintéticos fuesen totalmente no selectivos, porque todas las plantas verdes producen clorofila. Ahora bien, se descubrió que estos herbicidas eliminaban ciertas plantas y respetaban otras, como el trigo o el maíz, que continuaban creciendo normalmente. Esto se explica por el hecho de que las vías de la biosíntesis son reguladas de manera diferente en las diversas especies vegetales, si bien ciertas plantas son más sensible que otras a la acción de los fotoplaguicidas. El resultado de esto es una gran flexibilidad en la formulación que, en teoría, permitiría llegar a herbicidas muy selectivos. Más tarde, este tipo de compuestos resultaron ser unos insecticidas muy eficaces.

Estos avances de la agroquímica también han tenido repercusiones en otras disciplinas, especialmente en medicina, donde las porfirinas y sus derivados se utilizan para la terapia fotodinámica de ciertos cánceres. El principio de esta terapia consiste en obligar a las porfirinas a acumularse preferentemente en los tejidos enfermos y luego destruir selectivamente el tumor con la ayuda de una iluminación intensa, en forma de un láser y una fibra óptica. Esta técnica ya se ha utilizado con éxito para tratar ciertos tumores fácilmente accesibles, como los tumores de piel o los ginecológicos.

S.F.-F ■

***Para más información:***

■ K.R. Downun, *Light activated plant defence*, *New Phytol.*, *122*, 401-420, 1992.
■ J.R. Heitz y K.R. Downun (eds.), *Light activated pest control*, *ACS Symposium series nº 616*, American Chemical Society, Washington DC, 1995.
■ Leonard I. Grossweiner, «Photodynamic therapy», *J. Laser Appl.*, *7 (1)*, 51-57, 1995.

# NATURALISTAS DE LA PREHISTORIA

Pedro Lima

## Los pintores del Magdaleniense habrían intentado representar la realidad

**PEDRO LIMA** es periodista científico.

Los artistas del Magdaleniense ¿pintaban animales abstractos o en situación? Si bien la primera hipótesis es hasta hoy la predominante, el prehistoriador Jean Clottes y el etólogo Gilbert Maury presentan nuevos argumentos en favor de la segunda. Y ponen en entredicho la idea de un arte rupestre que sólo tenía fines rituales.

Durante el Magdaleniense, (periodo comprendido entre 7.000 y 10.000 años B.P.), los pintores prehistóricos representaron en las cuevas del Ariège y de Cantabria un gran número de animales, entre ellos una gran cantidad de bisontes. ¿Qué razones podrían tener estos artistas para dibujar, a menudo en condiciones muy penosas, animales en las paredes de piedra?

Desde las investigaciones realizadas por el abate Breuil, pero sobre todo por el etnólogo y prehistoriador André Leroi-Gourhan, este arte se considera como esencialmente religioso: las cuevas adornadas serían verdaderos santuarios en los que se expresaba, a través de sus asociaciones elaboradas y organizadas de diferentes temas animalistas, una concepción compleja del Universo.[1] Dentro de esta óptica, los animales pintados

(1) D. Vialou, «Art préhistorique-Europe», *Encyclopaedia Universalis.*

**Escenas de la vida animal cotidiana,** *reproducidas en el «Salón negro» de la cueva de Niaux (Ariège, Francia). Cuatro bisontes están representados en compañía de dos íbices (arriba a la izquierda y centro a la derecha). El bisonte de arriba es un joven adulto macho en postura de escucha. En el centro, otro adulto macho manifiesta signos de impaciencia: balancea la cola y rasca el suelo. Abajo (ampliado en la foto de la izquierda), una hembra de cabeza muy esbelta se enfrenta a un bisonte joven, probablemente una de sus crías. (Fotos Jean Clottes.)*

son considerados generalmente como símbolos destinados a evocar la especie a que pertenecen y no como animales individualizado. Así, Leroi-Gourhan habla de «bestiario estereotipado».[2] Pero, ¿es éste realmente el caso?

Para estar seguro, el prehistoriador del CNRS Jean Clottes se dirigió, hace dos años, a un especialista del bisonte, el etólogo Gilbert Maury: «Deseaba que examinara los bisontes magdalenienses, preguntándole si era capaz de individualizarlos a través de ciertos detalles referentes a la postura o a la anatomía. En efecto, los prehistoriadores dejamos generalmente de lado numerosos índices morfológicos que, no obstante, pueden estar cargados de sentido».

Los dos investigadores se lanzaron al estudio comportamental de doscientos cincuenta y dos bisontes que adornan las paredes de trece cuevas del Ariège.[3]

Durante la experiencia, el etólogo, que reconoció en el bóvido magdaleniense (*Bison priscus*) el ancestro directo del bisonte de la Europa actual (*Bison bonasus*), distinguió sin dificultad los machos de las hembras y los jóvenes de los viejos. Enumeró una serie de actitudes características más frecuentes de un estado particular de los animales: escucha, postura defensiva, carrera, lameteo y celo. Las actitudes específicas más frecuentes corresponden a las posiciones de defensa, de retirada y de ataque: representan el 48 % del total. Una de las actitudes más interesantes, que no se había señalado hasta aquí, es la del bisonte muerto acostado sobre un flanco: este estado se traduce por una rigidez de las patas y una posición característica de las pezuñas, que se extienden hacia adelante.

«Esta experiencia modifica, en gran medida, nuestra percepción del arte rupestre», comenta Jean Clottes. «Los pintores no representaban una imagen estereotipada del bisonte como se pensaba. Por el contrario, pintaron bestias identificables por su edad y su sexo: esto prueba que los magdalenienses no tenían una visión abstracta de su entorno natural, sino que atribuían una gran importancia al bisonte en tanto que individuo». El hecho de que los pintores hubiesen atribuido una escasa importancia a los símbolos sexuales primarios, como por ejemplo el pene, demuestra que transcribían lo que veían a su alrededor: visto de lejos, el bisonte macho se reconoce fácilmente por su corpulencia, mientras que su atributo sexual es poco visible.

**Los bisontes pintados son mayoritariamente machos, lo cual se contradice con la teoría aceptada**

Esta visión realista del mundo, opuesta al simbolismo mágico que presuponen las interpretaciones clásicas del arte paleolítico, serían realmente el reflejo de un modo de pensar propio de los cazadores prehistóricos de bisontes y renos. Mientras que nosotros sólo disponemos de un solo término para designar cada especie, al que adjuntamos los adjetivos que caracterizan su estado (macho, hembra, joven, viejo, muerto, etc.), los magdalenienses inmersos en su medio natural y observadores atentos de su fauna, probablemente manejaban tantos «conceptos-bisonte» como cuantos tipos morfológicos y actitudes diferentes habían en este animal. «Pienso —prosigue Jean Clottes— que estos hombres debían disponer de otras tantas palabras para designar estos diferentes conceptos. Esta riqueza lingüística se encuentra en ciertas sociedades tradicionales que han sido estudiadas por los etnólogos: por ejemplo, los Sami, un pueblo del Ártico de grandes cazadores de renos, disponen de cinco palabras para designar las variaciones de color del pelaje de sus presas».

Otra novedad: los bisontes representados son mayoritariamente machos, lo cual es incompatible con la teoría inicial de Leroi-Gourhan. Este último veía una dualidad fundamental en la representación que el hombre del paleolítico se hacía del mundo, una separación basada en la «díada» formada del caballo como símbolo macho y del bisonte como símbolo hembra. Ahora bien, sobre ciento setenta y ocho bisontes cuyo sexo pudo identificar claramente Gilbert Maury, ciento veintiuno son machos, o sea, más de los dos tercios del conjunto. «Es difícil imaginar que unos pintores que deseaban simbolizar el principio femenino lo hiciesen representando esencialmente bisontes machos», asegura Jean Clottes, que recuerda que la hipótesis de la dualidad ya había sido discutida por numerosos investigadores. Por otra parte, la frecuente asociación del bisonte y del caballo en las paredes de las cuevas magdalenienses, sobre la que Leroi-Gourhan ha insistido, es posible que sólo tradujera una simple realidad etológica. «Cuando los bisontes se dejan en libertad, como es el caso actualmente en el parque natural de la Margueride (Francia), sienten espontáneamente un gran interés por los caballos, a los que se acercan siempre que pueden», observa Gilbert Maury.

Actualmente, quedan por confirmar estos resultados mediante observaciones más completas, comprendiendo principalmente los bisontes de otras cuevas. Los dos investigadores trabajan en ello con dos objetivos: poner en evidencia ciertas constantes en la frecuencia de aparición de los diferentes temas que ya se han catalogado y destacar las variaciones según las regiones y los periodos estudiados.

**P.L.** ■

**MUSEO DEL PÉRIGORD (PÉRIGUEUX - 24)**
Visita comentada en el ámbito de las salas galo-romanas: Evolución del hombre y de sus técnicas en el Paleolítico. Introducción a las técnicas de la pintura en esta época y a la técnica del fresco.

**BP**
*Before present*, antes del presente. Fijado convencionalmente en el año 1950.

(2) A. Leroi-Gourhan, «Resumé des cours et travaux», *Annuaire du Collège de France*, 1980-1981.

(3) J. Clottes, M. Garner y G. Maury, «Magdalenian Bison in the Caves of the Ariège», *Rock and Research (Australia)*, vol. 11, 1994.



*Uno de los bisontes de Europa* (Bison bonasus) *del parque natural de la Margueride (Lozère), reintroducido en Francia por Gilbert Maury en 1991. El* Bison bonasus *es considerado como el descendiente directo del* Bison priscus, *cazado y pintado por los magdalenienses. (Foto Gilbert Maury.)*

# 40.000 km VOLANDO

Stéphane Deligeorges

## El charrán ártico, campeón de las migraciones estacionales

STÉPHANE DELIGEORGES
es periodista científico.

**Su epíteto, ártico, no traduce su gusto por la Antártida. No obstante, este animal septentrional emigra cada año al polo sur. Al regresar, los charranes árticos vuelven a su nido y reconstituyen sus antiguas parejas.**

La migración es uno de los comportamientos animales más fascinantes. Sin embargo, más allá de la curiosidad científica que provoca, la migración reviste inevitablemente una poderosa carga poética. Una inmediata demostración de este hecho la constituye el ejemplo que aquí nos ocupa, el de una determinada especie de aves marinas, los charranes árticos. En un mismo año, este animal migratorio puede ir de un polo al otro. Después de anidar en una zona boreal, emprende en junio una peregrinación cuyo término le conducirá a la Antártida, en pleno verano austral, donde los días tienen 24 horas y las aguas están libres. Este viaje de ida y vuelta, una vez el charrán ha vuelto a la zona boreal, constituye un vuelo de 30.000 a 40.000 km. Es como si a esta ave no le gustaran más que las zonas donde el día es prácticamente permanente, como si detestara las largas noches.

Existen, por supuesto, otros colosos de los vuelos prolongados: el albatros aullador, por ejemplo. Un ejemplar de esta especie que fue anillado muy joven en las Kerguelen fue encontrado diez meses más tarde en la costa chilena después de haber recorrido unos 18.000 km. O también el zarapito de Tahití, el cual, después de anidar en la tundra de Alaska, debe franquear más de 10.000 km a través del océano Pacífico para llegar a sus cuarteles de invierno, todos ellos situados en las islas de Polinesia. Ahora bien, durante los largos trayectos de su migración, este animal no tiene prácticamente ninguna posibilidad de descansar y alimentarse. La más larga etapa, sin interrupción, es de 3.000 km. Pero la peculiaridad del charrán estriba en su extraordinaria odisea universalmente repetida, en la circunnavegación transecuatorial que lo lleva a desplazarse una distancia del orden de la circunferencia terrestre. El charrán es el único visitante permanente de nuestros dos polos.

*Ilustración original de Gaëtan du Chatenet.*

Hace tiempo, los hombres, al constatar que las aves desaparecían al llegar el invierno, elaboraron explicaciones fantásticas que todavía conservan todo su sabor. Se decía que se iban a la Luna, que se transformaban en otras especies, o también que pasaban el invierno enterrados en el lodo de los lagos y estanques. La realidad del vuelo de los charranes hacia el extremo meridional, el continente blanco, supera todas estas fantasías.

*Sterna paradisae* es un ave de 30 cm, de envergadura comprendida entre 75 y 80 cm, un peso de entre 80 y 120 g y un pico rojo extremadamente afilado. Su cabeza está recubierta de una pequeña capucha negra que contrasta con la blancura del plumaje. Su cola, larga y en forma de V, su virtuosismo y su velocidad de vuelo explican su sobrenombre de golondrina de mar, que por lo demás es su nombre en alemán. La mayoría de los charranes árticos anidan y viven a orillas del océano Ártico. Se encuentran charranes en el extremo de Groenlandia, en el cabo Morris Jesup, considerado como la tierra más septentrional del mundo, en Canadá, Alaska, Siberia, Noruega, Irlanda y las islas Británicas. Su población mundial se estima en un millón de parejas. J.-M. Pons, investigador del Museo de Historia Natural de París, indica que se pueden contar las parejas que viven en Francia con los dedos de una mano. «El charrán se puede localizar en las costas bretonas, que constituyen el límite meridional del área de reproducción de la especie. Recientemente, sólo unas pocas parejas aisladas se han reproducido esporádicamente en el archipiélago de Ouessant.»[1] Falta comprender por qué, en un cierto momento, el charrán decide emprender anualmente el más largo viaje migratorio de todas las especies de aves.

Hay muchas lagunas en el conocimiento que tenemos de esta hazaña. ¿Cuáles son exactamente sus itinerarios migratorios? ¿Cuáles son sus estrategias de orientación y de navegación?

Globalmente, es posible aceptar las teorías que ven en el fenómeno de la migración una reacción a las condiciones de fluctuación anual del hábitat. Por ejemplo, la concentración de aves como los charranes en inmensas colonias durante el periodo de reproducción puede producir una disminución local importante de las reservas alimentarias. Es indudable que deben haber poderosas razones para dejar un lugar familiar, con un medio ambiente perfectamente conocido y un potencial alimentario perfectamente identificado para emprender un periplo probablemente agotador, siempre azaroso, a través del mundo.

El charrán emigra hacia el verano austral de la Antártida justo después del periodo de reproducción. Una vez más, el destino está a unos 20.000 km. Las rutas migratorias son complejas. En su mayoría parecen seguir el litoral, pero durante las tempestades ciertos individuos se desvían hacia el interior de las tierras, por ejemplo hasta el Sahara. Otro ejemplo: los charranes del Báltico atraviesan Escandinavia. No obstante, algunos ejemplares, avanzado el viaje, llegan a encontrarse en los Andes colombianos, a 2.000 metros de altitud. Globalmente, sin embargo, se puede considerar que las aves que anidan en el este de Canadá y Groenlandia parten hacia el sudeste. Allí se reúnen con los que vienen del norte de Europa, de Spitzberg, de Siberia. Luego, todos los charranes siguen la costa ibérica y entran en la costa de África occidental, que constituye una especie de gran avenida para las numerosas especies migratorias que encuentran reposo o llegan a destino en Mauritania o Senegal.

**El más viejo charrán ártico conocido, de 26 años de edad, habrá recorrido más de un millón de kilómetros**

A esta latitud, se ha observado una importante variación en los trayectos migratorios de los charranes. Algunos atraviesan el océano Atlántico y bordean las costas de América del Sur. La mayoría prosiguen su ruta hacia el cabo de Buena Esperanza. Hacen allí una pausa en el sector de la corriente Benguela, frente a las costas de África del Sur. Luego prosiguen su ruta hacia la Antártida y sus aguas ricas en plancton. Los individuos nativos de Alaska, por su parte, bordean el oeste del litoral americano, de norte a sur, y acceden a la Antártida por el cabo de Hornos.

En general, los movimientos de los charranes en la Antártida se basan en el sistema de vientos dominantes. Cuando alcanzan el borde de los hielos, son empujados hacia el este. Los que han llegado bordeando las costas de América del Sur siguen a las que han llegado bordeando el África occidental. Luego, el régimen de los vientos se invierte. En el verano austral, cuando los hielos retroceden, los charranes son empujados hacia el oeste. Observaciones realizadas en barcos han puesto de manifiesto que bandadas de aves se posan sobre los hielos flotantes y devoran el krill de estas zonas de agua libre. En marzo, después de haber mudado y engordado (uno de los preparativos fisiológicos necesarios para el viaje de regreso), los charranes emprenden el viaje hacia el Ártico siguiendo itinerarios próximos a los del viaje de ida. En mayo o junio, según la latitud de su terriotorio de nidificación, ya están de regreso. Hay que añadir que el charrán ártico es muy longevo. La colocación de anillos ha revelado que la media está en torno a unos veinte años. Cuando los charranes, después de haber recorrido decenas de miles de kilómetros, con un sentido de la orientación fuera de lo común, llegan al Gran Norte, se dirigen al lugar que ocupaban el año anterior. Se reúnen luego en grandes colonias ruidosas y se aparean. Muchas de estas aves viajeras vuelven a encontrar a su cónyuge después de un largo periplo, pues, entre los charranes, la parejas suelen durar toda la vida. ¿Poseen estas aves, como los pájaros bobos y los flamencos rosas, un sistema de reconocimiento sonoro de sujeto a sujeto, como acaban de revelarlo recientes estudios realizados por un científico francés?[2]

En los machos, el apareamiento comienza con una especie de vuelo alto, una forma de parada nupcial magnífica por su virtuosismo. Los animales levantan el vuelo enérgicamente como para exhibir sus fuerzas, suben a varios cientos de metros de altura y las hembras los siguen. Al término de este ascenso, la pareja en potencia planea y zigzaguea hacia el suelo. Luego, para sellar la unión, los machos ofrecen peces a las hembras. Estas últimas eligen macho en función de este don. El gesto no es sólo simbólico, ya que las hembras sacan del alimento la energía que necesitan para la puesta. En general, es el macho quien construye un nido, poco profundo. Su compañera le ayuda decorándolo con vegetales y piedras. Cada hembra pone dos o tres huevos que se abren tres semanas más tarde. Los padres, desbordados, dan hasta veintinco comidas diarias a su progenie.

Se saben pocas cosas acerca de la enseñanza dada a los jóvenes. Se supone que éstos aprenden los rudimentos de topografía que les permitirán volver a su lugar de nacimiento. ¿Se basa esta pedagogía en las estrellas nocturnas, en el mapa magnético interno que les permitirá emprender a su vez la formidable migración? Cuando los adultos vuelven a marcharse, las crías raramente les acompañan. A veces, hacen la mitad del viaje. Sólo en la tercera primavera lo harán íntegro. El más viejo charrán ártico conocido vivió veintiséis años.[3] Esta ave, probablemente, recorrió un millón de kilómetros a lo largo de su existencia de una punta a otra de la Tierra.

S.D. ■

(1) *Nouvel atlas des oiseaux nicheurs de France*, Sociedad ornitológica de Francia, 1991.

(2) N. Mathevon, «Quels sont les paramètres acoustiques utilisables pour la reconnaissance individuelle chez les flamands roses?» *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 319, 2.932, 1996.

(3) *Atlas des oiseaux migrateurs*, bajo la dirección de Jonathan Elphick, Bordas, 1996. Versión inglesa: *Atlas of bird migration*, Collins, 1995.

# EL ORDENADOR BAJO EL ENCANTO CUÁNTICO

¿Conducirán las leyes tan particulares de la física cuántica a nuevas maneras de efectuar cálculos o de tratar la información? El artículo de A. Barenco *et al.* explica el principio del ordenador cuántico y sus cualidades potenciales. En el segundo artículo, S. Haroche y J.-M. Raimond exponen una opinión radical: para ellos, el ordenador cuántico es, sin duda, irrealizable.



# UN SALTO DE ESCALA PARA LOS CALCULADORES

Adriano Barenco, Artur Ekert, Chiara Macchiavello y Anna Sanpera

¿Está condenada a desaparecer la informática de los valores 0 y 1?

ADRIANO BARENCO, ARTUR EKERT, CHIARA MACCHIAVELLO y ANNA SANPERA trabajan en el Clarendon Laboratory de la Universidad de Oxford (Gran Bretaña). Constituyen el equipo de cálculo y criptografía cuánticos.

**En el mundo cuántico, los objetos se comportan de manera muy curiosa y pueden encontrarse en varios estados a la vez. ¿Y si se aprovechase esta desconcertante propiedad para realizar ordenadores de un tipo nuevo? Las unidades de cálculo de estas máquinas, todavía imaginarias, no serían los valores 0 y 1, sino que englobarían «superposiciones» de estos dos valores. Así concebido, el ordenador cuántico promete una aceleración masiva de los cálculos y la resolución de problemas reputados de insuperables.**

Cuando, por una razón u otra, dos interlocutores alejados tienen que intercambiar informaciones confidenciales, el principal medio de protección es el encriptaje. Si el mensaje es interceptado por una persona indiscreta, ésta sólo podrá descifrarlo (si no dispone de la clave) aplicando un gran trabajo. En efecto, con las técnicas modernas de criptografía, el descriptaje sin disponer de la clave es posible en teoría, pero imposible en la práctica: el tiempo de cálculo superaría los límites de lo razonable.

La confianza de los criptógrafos en sus invenciones, que juegan un importante papel en el mudo actual (transacciones bancarias, comunicaciones militares o diplomáticas, etc.), podría ser quebrantada por una informática futura que funcionaría bajo los principios de la física cuántica y no de la física clásica. En efecto, una tecnología que aproveche las leyes cuánticas, promete unas modalidades de cálculo y unos algoritmos enteramente nuevos, que podrían tratar de manera eficaz problemas que, actualmente, se consideran demasiado difíciles. Y no es solamente la criptografía la que podría cambiar completamente, sino también todos los campos del cálculo y del tratamiento de la información. Ésta es la imagen que se desprende después de algunos años de activas investigaciones, realizadas tanto desde el lado de la informática teórica como desde el de la física fundamental.

¿En qué principio difiere un ordenador cuántico (fig. 1) de su homólogo clásico? En primer lugar, detengámonos sobre el fragmento elemental de información, es decir, el bit. Desde el punto de vista físico, un bit es un sistema material susceptible de adoptar uno de dos estados distintos, que representan dos valores en el orden lógico —*sí* o *no*, *verdadero* o *falso*— o, más sencillamente, 0 o 1. Así, en un calculador numérico, la tensión entre las armaduras de un condensador haría el oficio de bit: se podría asociar el valor 1 al condensador cargado y el valor 0 al condensador descargado.

También se podría codificar un bit mediante dos polarizaciones diferentes de la luz o dos estados electrónicos de un átomo. Pero aquí aparece una diferencia esencial. Si se hace jugar el papel de bit a un átomo, la mecánica cuántica nos dice que este objeto, en uno de sus dos estados electrónicos diferentes, también puede prepararse de manera que presente una *superposición coherente* de

*Mundo Científico* ha publicado (1) «Los números primos», nº 161, octubre 1995.

estos dos estados. Con esto debe entenderse que el átomo estaría al mismo tiempo en el estado 0 y en el 1. Pero, ¿qué significa precisamente la extraña idea de que un objeto cuántico puede adoptar *dos estados distintos* al mismo tiempo?

Será más fácil entenderla considerando un fotón, ente cuántico por excelencia. Imaginemos que se le dirige hacia un espejo semirreflectante, es decir, un espejo en el que se refleja la mitad de la luz incidente y la otra mitad se transmite, por refracción, directamente a través de él (fig. 2A). ¿Dónde estará localizado el fotón después de su paso por el espejo? ¿En el haz reflejado o en el haz transmitido? El sentido común haría decir que el fotón *se encontraría en el haz reflejado o en el haz transmitido*, con una probabilidad igual para cada una de estas eventualidades. Es decir, se esperaría que el fotón optaría de manera aleatoria por uno de los dos caminos. Situemos dos detectores de fotones después del espejo semirreflectante, de manera que intercepten los recorridos de los dos haces: el fotón será detectado, con la misma probabilidad, por el contador 1 o por el contador 2. ¿Hay que concluir que, después de su paso por el espejo semirreflectante, el fotón se propaga realmente por el haz reflejado o por el haz transmitido, con la misma probabilidad del 50 %? No. De hecho, el fotón comparte los dos trayectos a la vez. Esta sorprendente respuesta puede justificarse recombinando los dos haces mediante dos espejos totalmente reflectantes y disponiendo en su punto de intersección un segundo espejo semirreflectante, provisto de dos detectores situados después del mismo para interceptar los dos haces transmitidos (fig. 2B).

**Q-BIT**
*q* por cuántico, *bit* por «binary digit».
Los anglosajones escriben *qbit*, por asonancia con *cubit*: el «codo» y, especialmente, el codo bíblico (44 cm).
*(N. del T.)*

Un dispositivo como éste revela un fenómeno realmente sorprendente de interferencia cuántica. Si el fotón siguiese al azar una u otra de las dos trayectorias, debería encontrarse una probabilidad del 50 % de detección del fotón por uno u otro de los detectores. Ahora bien, esto es justamente lo que no sucede.

Cuando los dos caminos posibles son exactamente de la misma longitud, se comprueba que la probabilidad es del 100 % de que el fotón llegue al detector 1 y del 0 % de que llegue al detector 2. Es seguro que el fotón será detectado en 1.

**Un bit clásico adquiere el valor 0 o el valor 1. En cambio, un bit cuántico también puede encontrarse en una superposición de los estados 0 y 1**

Parece imponerse la conclusión de que, de alguna manera, el fotón debe propagarse por las dos trayectorias a la vez. En efecto, si se interpone una pantalla opaca de manera que bloquee uno u otro de los recorridos posibles, se encontrará la misma probabilidad de que el fotón llegue a 1 o a 2 (fig. 2C). La obstrucción de uno de los trayectos permite, de acuerdo con los hechos, que el fotón vaya a 2; cuando los dos trayectos quedan libres, el fotón «sabe» de alguna manera que no debe ir a 2, lo que implica que ha tenido que explorar una y otra trayectoria. Por tanto, se tiene la base suficiente para declarar que, entre los dos espejos semirreflectantes, el fotón «recorre» al mismo tiempo el camino reflejado y el camino transmitido. En términos técnicos, se dice que el estado del fotón es una superposición coherente de una localización en el haz reflejado y de una localización en el haz transmitido.

Por los mismos principios, es posible obligar a un átomo que adopte una superposición de dos estados electrónicos distintos, es decir, uno más. De manera general, un sistema cuántico de dos estados, que se llamará bit cuántico o q-bit,* puede prepararse de manera que presente una superposición de sus dos estados, indicados como $|0>$ y $|1>$ (esta manera de escribir los estados cuánticos es muy cómoda por varias razones técnicas; fue introducida por el físico británico Paul Dirac en los años 1920). De esta manera, un solo y único q-bit puede codificar, en cualquier momento dado, los valores 0 y 1 a la vez.

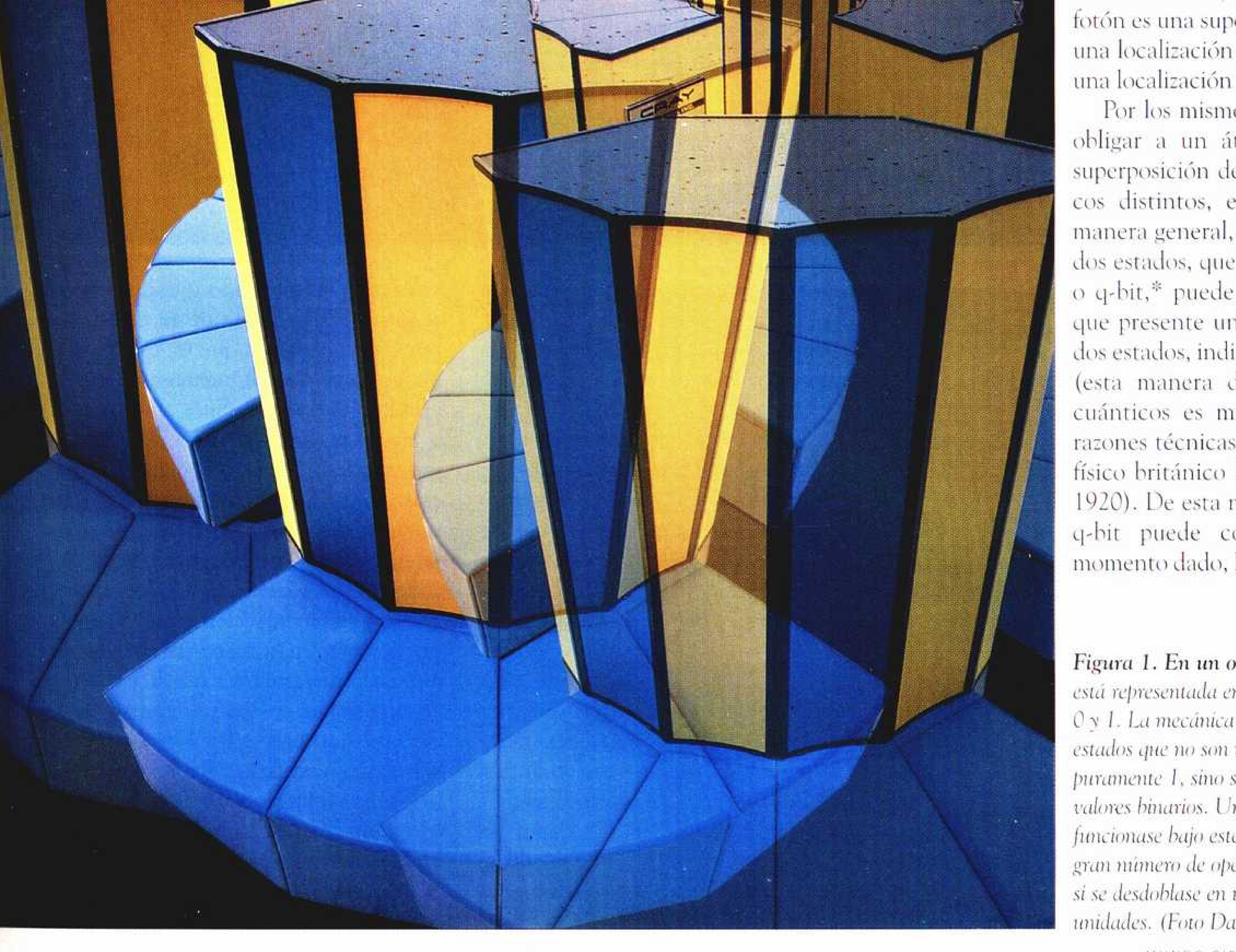



**Figura 1. En un ordenador,** *la información está representada en forma de series de valores 0 y 1. La mecánica cuántica permite pensar en estados que no son ni puramente 0, ni puramente 1, sino superposiciones de estos dos valores binarios. Un ordenador cuántico que funcionase bajo este principio, efectuaría un gran número de operaciones en paralelo, como si se desdoblase en un gran número de unidades. (Foto David Parker/SPL/Cosmos.)*

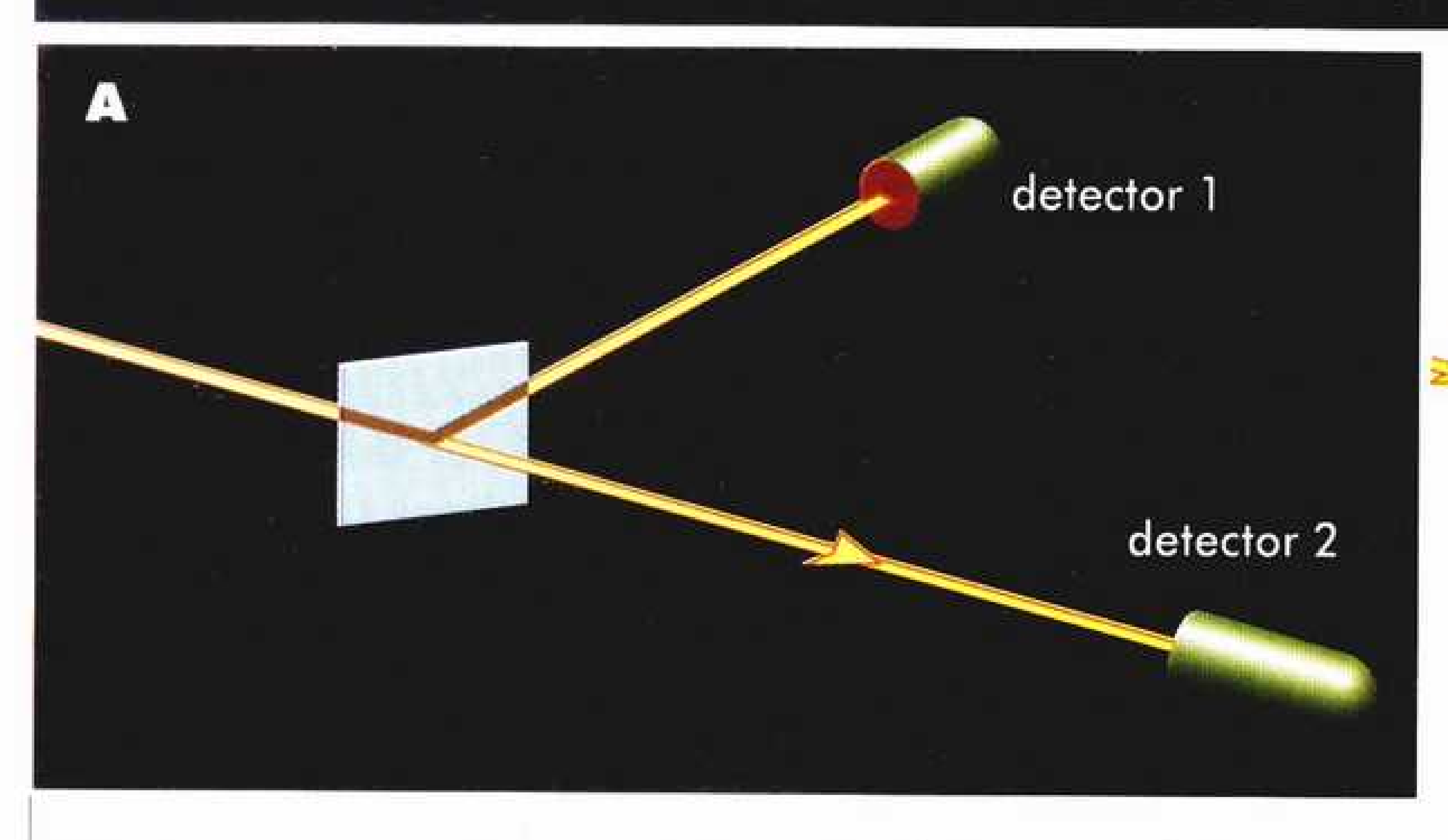
## FACTORIZACIÓN DE LOS ENTEROS CON UN ORDENADOR CUÁNTICO

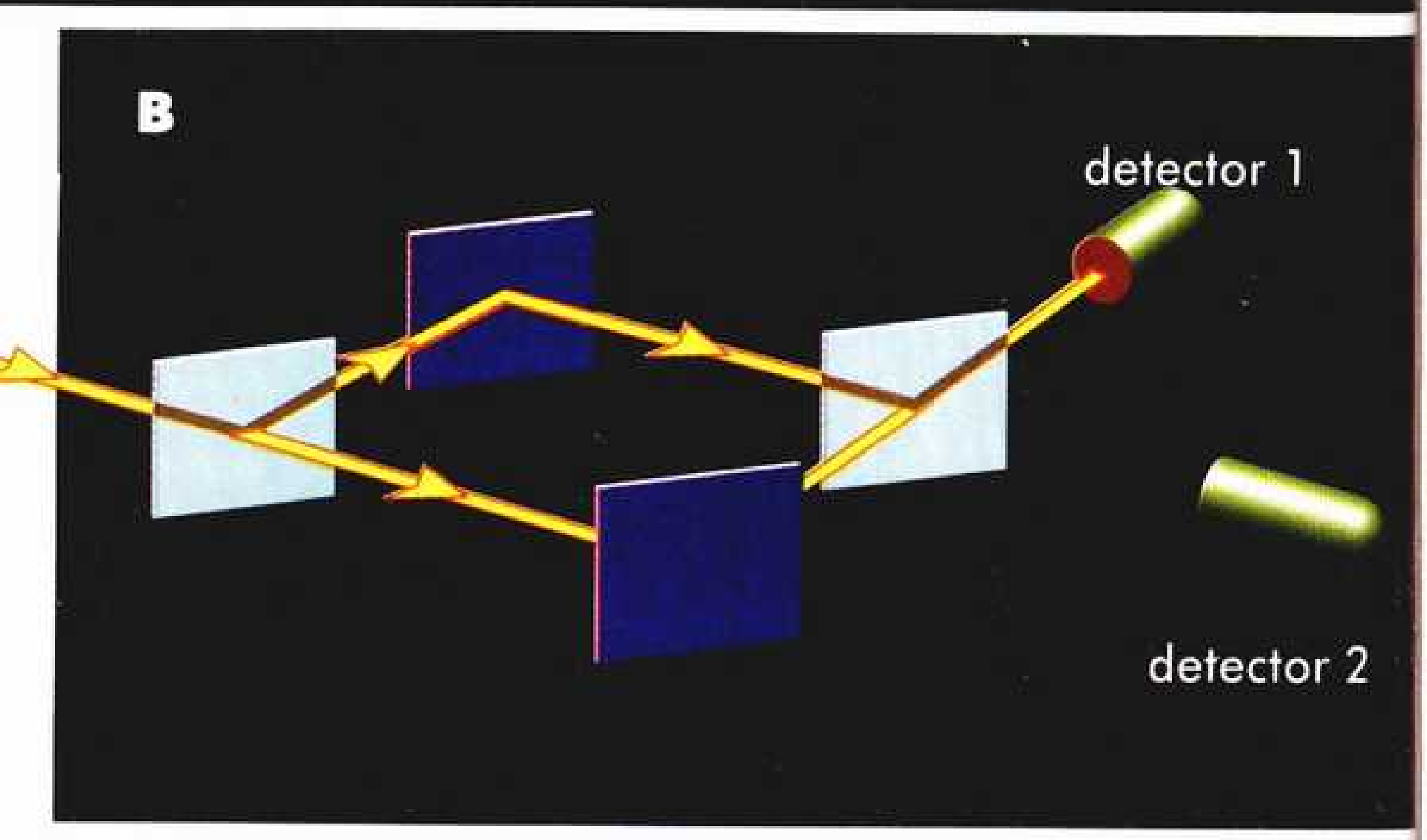
Para obtener la descomposición en factores primos de un número entero $N$, un método ingenuo consiste en calcular el resto de la división de $N$ por todos entero $p$ inferior a $\sqrt{N}$. Si el resto es igual a 0, $p$ es factor de $N$. Pero este método resulta muy poco eficaz: con un ordenador capaz de efectuar la comprobación para $10^{10}$ valores de $p$ distintos por segundo (o sea, a una cadencia mayor que la de cualquier ordenador construido hasta hoy), el tiempo medio necesario para factorizar un número de 60 cifras sería muy superior a la edad del Universo.

Los ordenadores cuánticos podrían utilizar una técnica muy diferente. En efecto, se demuestra que el problema de la factorización de un número puede vincularse al de la periodicidad de una función. A título indicativo de la manera de proceder, según este método elaborado por Peter Shor, tomemos un ejemplo sencillo: supongamos que se desea determinar los factores primos de $N = 15$. Para ello, se elige un número cualquiera, $a$, inferior a $N$ y sin factor primo con $N$ (esto puede comprobarse con un sencillo cálculo del máximo común divisor), por ejemplo, $a = 7$. Luego, para $x$ entero, se define la función $f(x) = 7^x \bmod 15$, que consiste en elevar 7 a la potencia $x$ y efectuar la división por 15: el valor de $f(x)$ es el resto de esta división. Así, tomando $x = 3$, se tendrá $f(x) = 13$, porque $7^3 = 343 = 15 \times 22 + 13$. Se puede demostrar que $f(x)$ es una función periódica, cuyo periodo $r$ está vinculado a los factores de 15. En el ejemplo elegido, se puede comprobar fácilmente que $f(x)$ toma los valores 1, 7, 4, 13, 1, 7, 4, ..., cuando $x$ vale 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, ... Esta función tiene por periodo $r = 4$. Una vez establecido este resultado, el cálculo de los factores de $N$ se realizará fácilmente hallando el valor del máximo común divisor (MCD) de $N$ y de $a^{r/2} \pm 1$. En nuestro ejemplo, la determinación del MCD de 15 y de $50 = 7^{4/2} + 1$ (resp. $48 = 7^{4/2} - 1$), proporciona efectivamente los valores 5 (resp. 3), es decir, los factores de 15.

Los ordenadores clásicos no están muy bien dotados para este método. En efecto, la determinación del periodo de $f$ obliga a calcular un gran número de veces el valor que toma $f$, un número del mismo orden que el de divisiones requeridas por el método ingenuo indicado anteriormente. Ahora bien, con un ordenador cuántico, la situación es completamente diferente: ajustando un registro cuántico para que presente una superposición de estados, representando 0, 1, 2, 3, 4 ..., permite calcular con una sola operación los valores $f(0)$, $f(1)$, $f(2)$, $f(3)$, $f(4)$, ... Como estos valores están codificados por una superposición de estados del registro cuántico, no es posible recuperarlos todos simplemente efectuando una medición. En efecto, la física cuántica nos dice que una medición directa sólo permite obtener una pequeña fracción de la información contenida en esta superposición de estados tan cuidadosamente construida. Sin embargo, no estamos interesados en los valores de $f$, sino sólo en el periodo de esta función. Procediendo de una manera ingeniosa, es posible extraer el periodo sin necesidad de medir directamente los valores adquiridos por $f$. Esto requiere una etapa suplementaria (conocida con el nombre de *transformación de Fourier cuántica*), que también puede desarrollarse muy eficazmente. El resto del algoritmo (cálculo de los MCD) no presenta dificultades, incluso con números muy grandes.

## Encontrarse en dos estados a la vez: la ubicuidad




Precisemos un poco las cosas. Un estado cuántico que describe una tal superposición se escribe, matemáticamente, en la forma $|S\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$, donde $a$ y $b$ son números complejos. Estos coeficientes tienen una significación física, contenida en los axiomas propios de la física cuántica. En particular, estos axiomas estipulan que una medición efectuada sobre un q-bit que se encuentra en el estado $|S\rangle$ dará el resultado $|0\rangle$ con la probabilidad $|a|^2$ o el resultado $|1\rangle$ con la probabilidad complementaria $|b|^2$ (como la suma de las diferentes probabilidades debe ser igual a 1, es necesario que $a$ y $b$ cumplan $|a|^2 + |b|^2 = 1$).

Partiendo de la superposición $|S\rangle$, un cálculo aplicado al q-bit consistiría en aplicar a $|S\rangle$ una cierta operación F, de manera que el estado inicial se transformaría en el estado $aF(|0\rangle) + bF(|1\rangle)$. Como puede verse, la transformación F actúa simultáneamente sobre $|0\rangle$ y sobre $|1\rangle$, lo cual ilustra una propiedad importante del cálculo cuántico: en una sola etapa se efectúan varias operaciones (aquí dos).

Llevemos más adelante esta idea. Tomemos un registro constituido por tres bits. Si es clásico, en un momento dado podrá memorizar uno (y solamente uno) de los ocho números posibles. En efecto, el registro sólo podrá encontrarse en una sola configuración de las ocho previsibles —000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 y 111—, cada una de ellas pudiendo representar un número (por ejemplo, 0, 1, 2, ..., 7 en el código binario usual). Pero un registro cuántico constituido por tres q-bits, podrá memorizar en cualquier momento dado, las ocho configuraciones *a la vez* en superposición cuántica (fig. 3). Las ocho tripletas ($|000\rangle$, $|001\rangle$, ..., $|111\rangle$) figuran todas en el estado que describe el registro: no hay por qué sorprenderse, teniendo en cuenta que un q-bit puede encontrarse simultáneamente en los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$. Si se añaden otros q-bits al registro, su capacidad de memorización crece exponencialmente: tres q-bits permiten memorizar ocho números distintos a la vez, cuatro q-bits pueden registrar dieciséis números distintos simultáneamente, etc. De manera general, un componente de $N$ q-bits puede tener en la memoria $2^N$ números al mismo tiempo. Una vez preparada la superposición, en una sola etapa se puede efectuar una misma operación F sobre cada uno de sus componentes.

Si, por tomar un ejemplo, los q-bits son átomos, unos impulsos láser convenientemente regulados permitirían manipular sus estados electrónicos, con lo que se harán evolucionar las superposiciones

iniciales. Esta evolución repercutiría en cada uno de los elementos de la superposición; así, se tendría un cálculo masivamente paralelo, pero efectuado sobre un solo componente cuántico. De esto se deduce que un ordenador cuántico es capaz de efectuar, en una sola y única etapa de cálculo, la misma operación matemática sobre $2^N$ números de entrada distintos, codificados por un estado (superpuesto) de un sistema de $N$ q-bits. Para realizar la misma tarea, un ordenador clásico está obligado a repetir el mismo cálculo $2^N$ veces, o debe utilizar $2^N$ procesadores distintos operando en paralelo. Es decir, el ordenador cuántico promete una ganancia masiva en términos de tiempo y de memoria.

Esto sólo se anuncia como una novedad avanzada de orden técnico, sin más. Los ordenadores clásicos parecen capaces de efectuar los mismos cálculos que los ordenadores cuánticos: eso sí, exigiendo más tiempo y más memoria. Sin embargo, esta impresión es falsa en dos puntos.

Por una parte, la manipulación de superposiciones cuánticas de valores 0 y 1 permite efectuar operaciones nuevas (véase el recuadro «Átomos para hacer cálculos»). Por ejemplo, un cálculo clásico transforma el valor binario 0 en 0 o en 1. En cambio, una operación F aplicada al estado cuántico $|0>$ puede transformarlo en una superposición $c|0> + d|1>$. De la misma manera, un programa cuántico podrá contener instrucciones tales como: «... ahora, crear una superposición de todos los números obtenidos en las operaciones precedentes...» o «aplicar la operación F a todos los elementos del registro a la vez». Estas instrucciones están desprovistas de sentido para cualquier dispositivo clásico, pero no para un ordenador cuántico.

Por la otra parte, la ganancia aportada por el paralelismo cuántico es cuantitativamente tan importante, que las capacidades del tratamiento de la información cambian de naturaleza. Examinemos más de cerca esta cuestión. Para resolver un problema específico, los ordenadores ejecutan un conjunto bien definido de instrucciones —un algoritmo—, cuya aplicación mecánica proporciona la solución. Algunos algoritmos son rápidos (como los de la suma y la multiplicación, que todos hemos aprendido en la escuela), mientras que otros son muy lentos (como los de factorización o los del juego del ajedrez).

Tomemos, por ejemplo, el problema de factorización siguiente: $a \times b = 29.083$. ¿Cuánto tiempo necesitaría usted, con un lápiz y un papel como únicas armas, para determinar los dos números enteros $a$ y $b$ (sólo hay una solución)? Digamos que, probablemente, una hora. En cambio, la resolución del problema inverso, $127 \times 229 = c$, siempre con lápiz y papel, le ocupará menos de un minuto. Esto confirma simplemente el hecho de que hay disponibles algoritmos rápidos para la multiplicación y que no se conocen otros parecidos para la factorización.

Para que un algoritmo sea «rápido» o «utilizable», según la definición estándar, lo que cuenta no sólo es la duración requerida para, por ejemplo, multiplicar un par de números dados, sino el hecho de que el tiempo necesario no aumente demasiado rápidamente a medida que se aplica el mismo método a números cada vez más grandes. Es el caso de la multi-

## del fotón atrapada en flagrante delito por un experimento simple

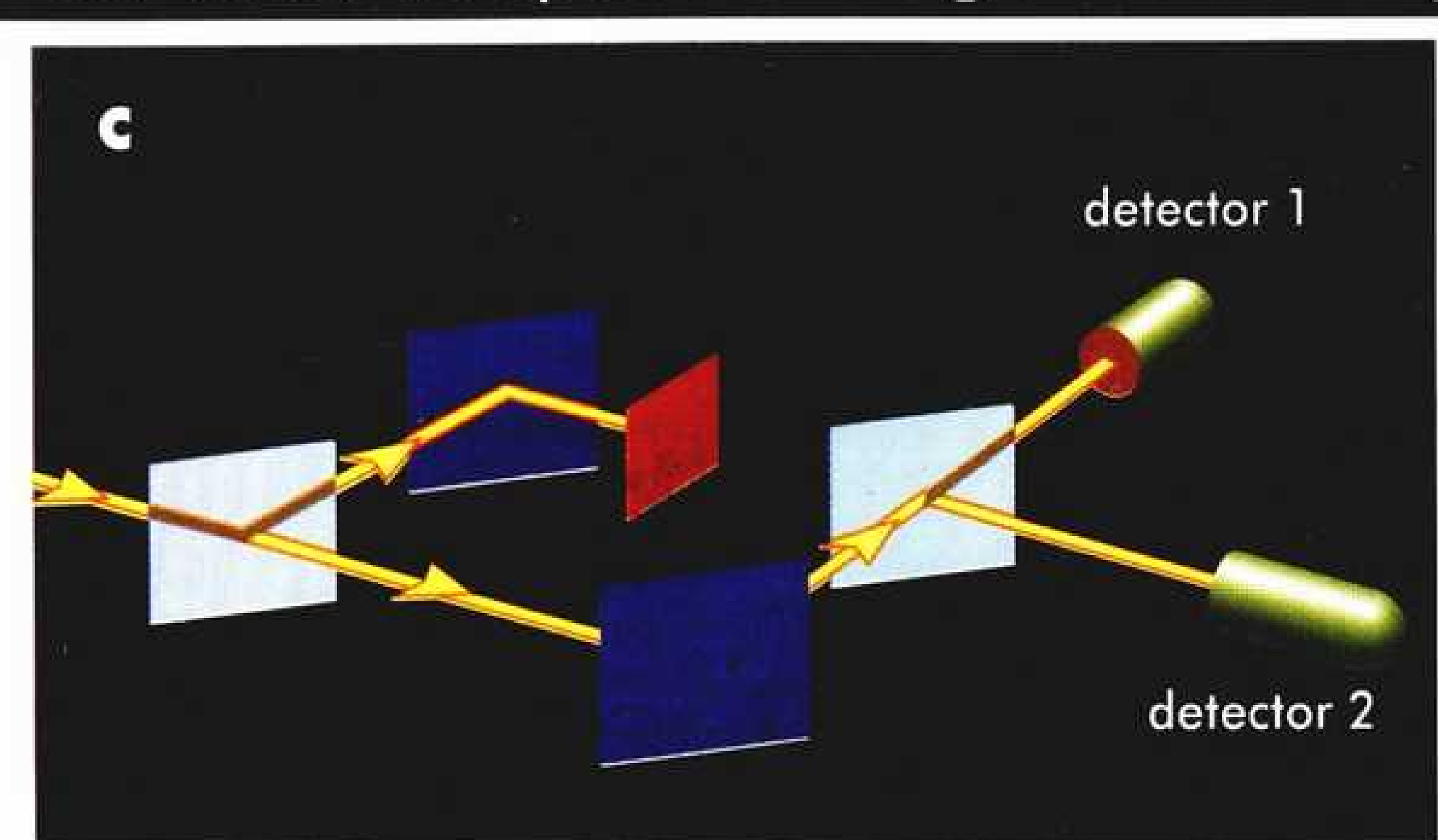



*Figura 2.*
*A: Un fotón llega a un espejo semirreflectante.*
*Activa el detector nº 1 o el detector nº 2, al azar.*
*La probabilidad es del 50 % para cada posibilidad.*
*B: Con la ayuda de dos espejos, las dos trayectorias posibles para el fotón se recombina en un segundo espejo semirreflectante.*
*Entonces se observa que el fotón sólo llega al detector nº 1 y nunca al detector nº 2.*
*C: Si se bloquea el camino de uno de los trayectos, se vuelve a la situación descrita en A.*
*Conclusión: en el caso B, el fotón ha «explorado» las dos trayectorias a la vez.*
*La interferencia entre las dos posibilidades es la que hace que el fotón vaya únicamente hacia el detector nº 1. Esta situación ilustra la idea de que un objeto cuántico puede encontrarse en varios estados simultáneamente.*

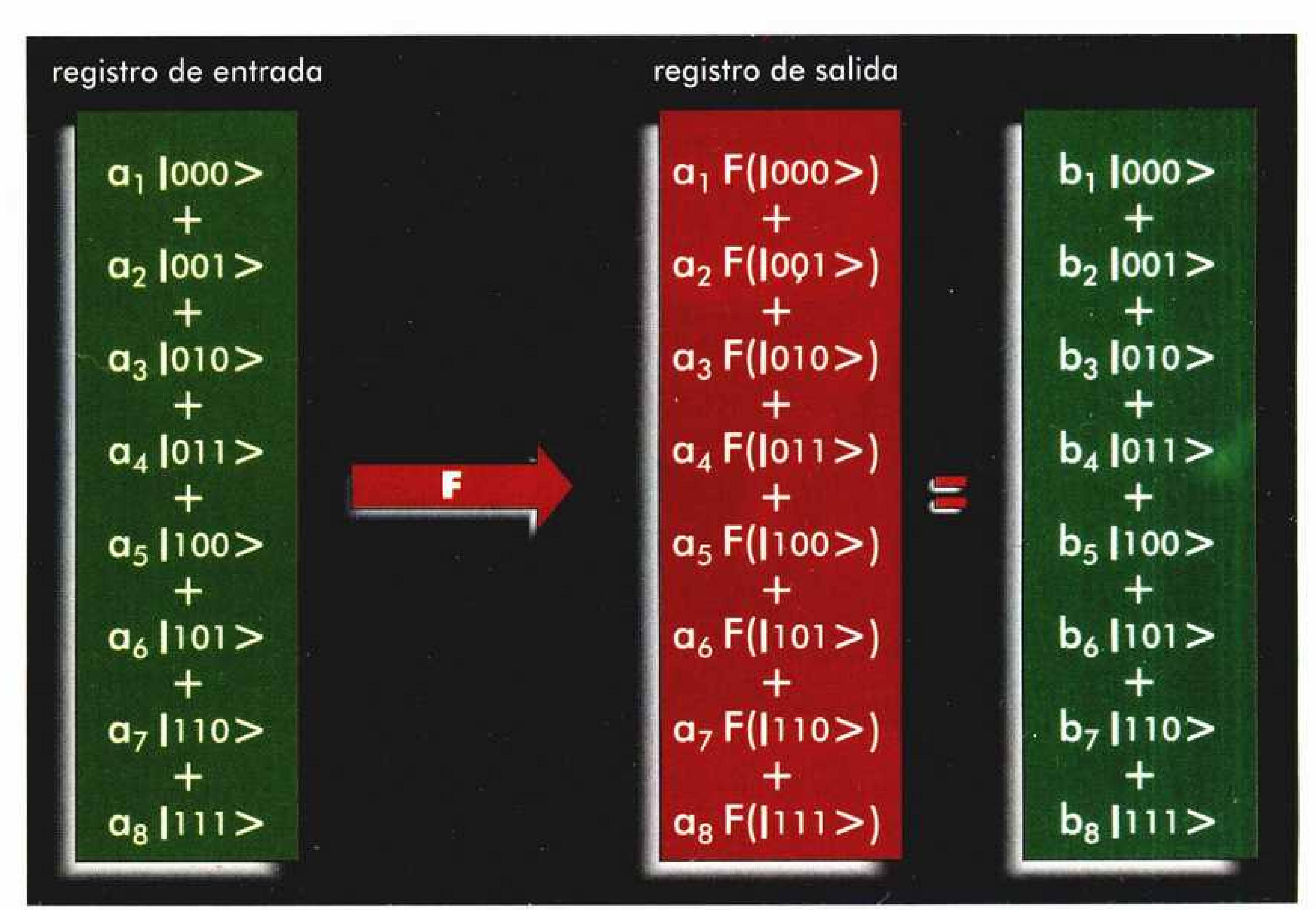



***Figura 3.* *Representación esquemática de un registro de tres bits cuánticos.*** *El registro se encuentra al principio en una superposición de sus ocho estados posibles. Se efectúa una operación F. Se aplica simultáneamente a los ocho componentes del estado inicial del registro. En efecto, el resultado del cálculo también equivale a una superposición de los ocho estados de base. Pero los coeficientes que los caracterizan son, en general, diferentes. Por tanto, el cálculo F ha transformado un conjunto de coeficientes ($a_1$, $a_2$, ..., $a_8$) en otro ($b_1$, $b_2$, ..., $b_8$).*

# ÁTOMOS PARA HACER CÁLCULOS

Todo sistema cuántico que posea dos niveles de energía distintos podría, en principio, servir de q-bit. Hasta ahora, los q-bits que han mantenido el favor de los experimentadores son átomos de rubidio (experimentos del ENS) o de berilio (experimentos del NIST). En un átomo, cada uno de sus diferentes electrones presenta niveles de energía discretos. Se pueden elegir dos de estos niveles, que se designarán como representativos de 0 y 1. Estos niveles corresponderán a estados específicos de excitación electrónica del átomo.

Para entender cómo es posible obtener a voluntad tal o cual valor lógico, tomemos un caso de figura simplificado. Imaginemos un átomo que tiene un solo electrón y que presenta dos niveles de energía: un estado fundamental $|0\rangle$, al que se le asigna el valor 0, y un estado excitado $|1\rangle$, de valor 1 (esquema A).



Supongamos que el átomo está inicialmente en el estado $|0\rangle$ y que deseamos efectuar la operación NO. La operación NO representa la negación del valor lógico inicial, de manera que 0 dará 1, mientras que 1 será 0. Esto es de fácil realización con átomos. Aplicando al electrón un impulso luminoso convenientemente ajustado en intensidad, duración y longitud de onda (la longitud de onda debe corresponder a la diferencia de energía entre los dos niveles electrónicos), se puede obligar al electrón que pase de un nivel al otro. En el caso de figura, si el electrón se encuentra inicialmente en el estado fundamental $|0\rangle$, absorberá una parte de la energía del impulso luminoso y, determinará una transición al estado $|1\rangle$ (esquema B). Si el electrón está inicialmente en el estado $|1\rangle$, el impulso luminoso provocará una transición al estado $|0\rangle$.



La operación lógica NO, tal como se ha definido antes, es totalmente inteligible en el marco de los conceptos clásicos. Sin embargo, también se podrán efectuar operaciones de orden puramente cuántico, que no ofrecen ninguna analogía con el campo clásico.

Así pues, aplicando un impulso luminoso de una duración menor que la mitad de la necesaria para la operación NO, se podrá formar una «semibáscula». Esto significa que solamente se efectuará la mitad de la operación 0 → 1 y, después de la aplicación del impulso luminoso, el átomo se encontrará en un estado que no será ni $|0\rangle$ ni $|1\rangle$, sino una superposición coherente de los dos estados (esquema C). Bajo la acción del fotón que se aloja en dos trayectorias al mismo tiempo (fig. 2), el electrón de nuestro átomo «queda» a la vez en el estado $|0\rangle$ y en el estado $|1\rangle$. Con un nuevo semiimpulso luminoso, un átomo que presente este estado ejecutará la operación NO pasando al estado $|1\rangle$.

Así, la operación NO se obtiene en la salida de dos «semibásculas» cuánticas sucesivas. Esta operación puramente cuántica se denomina «raíz cuadrada de NO» ($\sqrt{\text{NO}}$). Por emisión de dos «semi-impulsos» de este tipo, será posible establecer superposiciones de estados en la memoria de un ordenador cuántico (una memoria que comprenderá, naturalmente, un número importante de átomos). Las operaciones lógicas subsiguientes harán intervenir normalmente operaciones físicas más complejas, empleando muchos q-bits.



plicación, que no emplea mucho más tiempo cuando se pasa de dos números de tres cifras a dos números de treinta cifras.

Por el contrario, la factorización de un número de treinta cifras, por el método más elemental (véase el recuadro «Factorización de los enteros con un ordenador cuántico»), emplea unas 10[illegible] veces más de tiempo o de memoria que para un número de tres cifras. El consumo de recursos informáticos se hace desaforado a medida que aumenta el número de cifras. El número más grande que se ha factorizado hasta hoy —se trata de un número cuyos factores se habían decidido previamente y mantenido en secreto por unos matemáticos para presentar un reto a sus colegas— estaba formado por 129 cifras. Para hallar la solución, fue necesario el concurso de decenas de ordenadores en todo el mundo durante varios meses. No se tiene ni idea de cómo proceder para la factorización de un número de, por ejemplo, mil cifras; el cálculo exigiría un tiempo bastante mayor que la edad atribuida al Universo.

Los informáticos disponen de una manera de definir rigurosamente lo que hace que un algoritmo sea rápido (y utilizable) o lento (e inutilizable). Para que un algoritmo sea rápido, es necesario que el tiempo requerido para su ejecución no presente un crecimiento más rápido que el de una función polinómica del tamaño de los datos. Esquemáticamente, el tamaño de los datos corresponde al número total de bits necesarios para especificarlos: por ejemplo, el número de bits necesarios para codificar el número que debe factorizarse. Un problema para el que no se conozca ningún algoritmo cuyo tiempo de ejecución sea incrementado por un polinomio (en función del tamaño de los datos), se considera arduo. Por ejemplo, la multiplicación es un procedimiento «rápido» porque se conoce un algoritmo polinómico, al contrario de la factorización, que constituye un problema arduo. Por «arduo» no hay que entender «de resolución imposible» o «no calculable» —la factorización es absolutamente calculable con un ordenador clásico—, aunque los recursos de hardware necesarios para factorizar un número grande son tan importantes que, desde un punto de vista estrictamente práctico, se puede considerar que el problema es inabordable.

Señalemos que los informáticos, al definir la eficacia de los algoritmos, han tenido gran cuidado en proceder de manera que quede excluida toda referencia a un hardware específico. Así, la factorización constituye un problema arduo para cualquier ordenador clásico,

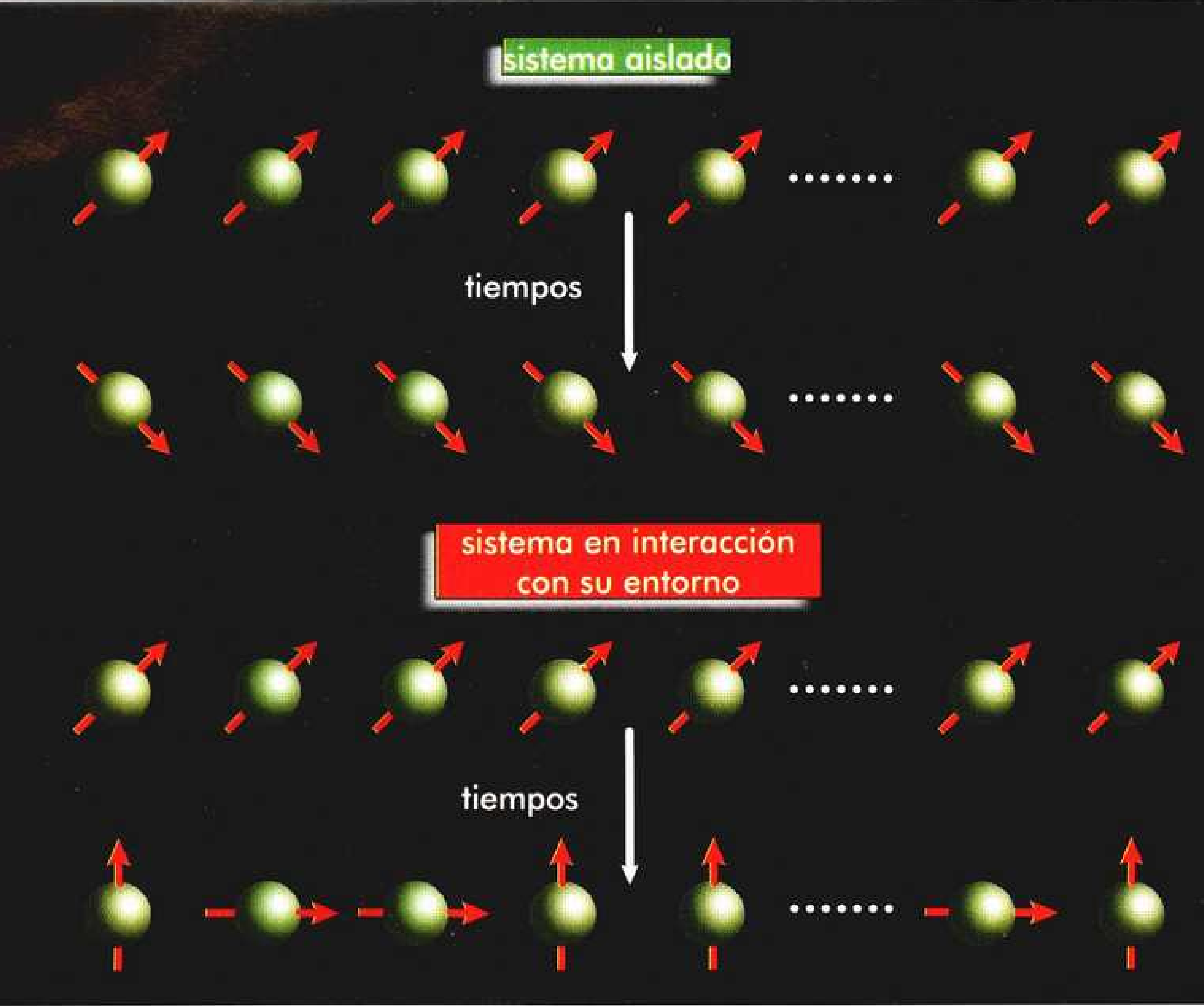



*Figura 4. La interacción de un sistema cuántico con el entorno macroscópico destruye, en un tiempo extremadamente corto y de manera incontrolable, las superposiciones de estados. Este proceso, llamado decoherencia, es sin duda, el principal obstáculo que se alza delante de la idea del cálculo cuántico. El principio de la decoherencia se ilustra aquí con un sistema de átomos, cada uno de los cuales puede encontrarse en dos estados, simbolizados por flechas dirigidas hacia arriba y hacia la derecha. Una superposición de estos dos estados corresponde a una flecha oblicua. Esquema de arriba: el sistema está bien aislado y la evolución en el tiempo está controlada. Esquema de abajo: el sistema interacciona con el entorno y las superposiciones se han destruido de manera aleatoria.*

sea cual sea el modelo. Tanto si se trata de un ordenador moderno como de su ancestro del siglo XIX, la máquina diferencial de Babbage, el tiempo necesario para factorizar un número sufrirá un crecimiento exponencial a medida que este número aumente, tanto en un caso como en otro.

Una simple mejora técnica será capaz de acelerar los cálculos en un factor fijo, sin ninguna incidencia sobre la relación exponencial entre el tamaño de los datos y la duración de ejecución. En cambio, las superposiciones cuánticas pueden mejorar cualitativamente esta relación, precisamente gracias a su capacidad de tener en cuenta un número exponencial de términos distintos ($N$ q-bits → $2^N$ posibilidades tratadas simultáneamente). Ésta es la razón de por qué unos algoritmos adaptados específicamente a un calculador cuántico podrían transformar problemas actualmente difíciles, como la factorización, en problemas «resolubles» desde el punto de vista práctico.

La puesta a punto de estos algoritmos representa una tarea que está lejos de ser trivial. Uno de los principales obstáculos concierne a la recuperación de la información. En efecto, si una superposición cuántica engloba varios estados a la vez —cada una codificando un número—, una medición única no permite extraer todas estas informaciones. En el caso de un solo q-bit, por ejemplo, antes se ha visto que la medición da el resultado 0 o el resultado 1 con ciertas probabilidades. Los dos resultados obtenidos por el procesador cuántico no están disponibles simultáneamente. Es posible eludir esta dificultad, pero los procedimientos necesarios son demasiado técnicos para explicarlos aquí. Este problema de la recuperación de la información explica por qué el diseño de los algoritmos cuánticos exige un buen nivel de sutilidad.

También explica en parte la juventud del campo. La historia del calculador cuántico, en su origen, se remonta a 1982, año en que el físico norteamericano Richard Feynman abordó el problema de la simulación numérica de ciertos sistemas cuánticos. Sin ni siquiera haber imaginado el ordenador cuántico, llegó a la conclusión de que los recursos de cálculo necesarios no dejaban mucha esperanza al éxito con los ordenadores clásicos y sugirió la posibilidad de lograr estas simulaciones con máquinas que hiciesen intervenir efectos cuánticos.[1]

Sin embargo, no se llegó a sospechar la excepcional potencia de cálculo cuántico hasta 1985, cuando David Deutsch, de la Universidad de Oxford, publicó una memoria teórica crucial que describía un calculador cuántico universal.[2] El autómata de Turing, descrito por el matemático británico del mismo nombre en los años 1930, era el primer modelo teórico que describía cualquier ordenador (clásico). El calculador de Deutsch representa su par cuántico.

Después de la publicación del trabajo de Deutsch, se buscaron tareas dignas de interés, susceptibles de ser efectuadas apropiadamente por un ordenador cuántico. En un primer momento, nadie supo encontrar más que algunos problemas matemáticos pasablemente solucionados, hasta el punto de que la propia problemática del cálculo cuántico, en su conjunto, quedó tan sólo como una curiosidad académica.

Esta situación cambió radicalmente en 1994, cuando Peter Shor, de los laboratorios ATT&T-Bell de Estados Unidos, puso a punto el primer algoritmo cuántico susceptible de efectuar una factorización de manera eficaz[3] (véase el recuadro «Factorización de los enteros con un ordenador cuántico»). Este algoritmo fue promovido al rango de «aplicación contundente»: una tarea extremadamente útil que sólo un ordenador cuántico es capaz de efectuar. ¿Por qué? Porque la propia dificultad de la factorización sirve de fundamento para muchos métodos usuales de criptografía. Así, el código RSA —el sistema más difundido de criptografía de clave pública, aplicado frecuentemente para la protección de las transacciones bancarias por vía electrónica— basa su seguridad en la dificultad de factorizar los grandes números.[4]

## El principal enemigo del ordenador cuántico: la interacción con el medio macroscópico, que destruye las superposiciones de estados

Queda por saber cómo se puede realizar un ordenador cuántico. En principio, esto es bastante claro. En una primera etapa, se podrán poner a punto «puertas lógicas» simples y, luego, proceder a su integración para formar circuitos cuánticos. Una puerta lógica cuántica, al igual que su homóloga clásica, es un dispositivo de cálculo muy sencillo, que sirve para efectuar una operación elemental, y utiliza habitualmente dos q-bits en un lapso de tiempo dado[4] (véase el recuadro «Átomos para hacer cálculos»).

Sin embargo, al ensamblar cada vez más y más puertas cuánticas en un circuito, se presentarán muy rápidamente serios problemas de orden práctico. A medida que el número de q-bits utilizados aumenta, el ingeniero tendrá cada vez más dificultades para asegurar que una interacción no genere interferencias cuánticas. Además de la dificultad técnica de intervenir a la escala del átomo o del fotón individual, uno de los problemas más importantes es evitar que el medio ambiente afecte los procesos que sirven para crear las superposiciones cuánticas.

En efecto, la interacción con el entorno macroscópico, que es muy difícil de controlar y sólo en parte, destruye en un tiempo increíblemente breve las superposiciones de estados. Por otra parte, esto explica que un instrumento de medida,


(1)
R. Feynman, *Int. J. Theor. Phys.*, 21, 467, 1982.
(2)
D. Deutsch, *Proc. R. Soc. London*, A 400, 97, 1985.
(3)
P.W. Shor, en «Proceedings of the 35th Annual Symposium on the Foundations of Computer Science», editado por S. Goldwasser (IEEE Computer Science», Society Press, Los Alamos, CA), 124, 1994.
(4)
A. Barenco *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 74, 4.083, 1995.

objeto macroscópico, no registre nunca las superposiciones: siempre indica un resultado no ambiguo. La desaparición de las particularidades cuánticas bajo el efecto de la interacción con un sistema macroscópico es un proceso llamado «decoherencia» (fig. 4). Este mecanismo, identificado y estudiado por los teóricos de la física cuántica hace solamente algunos años, podría explicar también la transición entre los comportamientos clásicos y los comportamientos cuánticos.[II]

Para lograr el ordenador cuántico, la decoherencia es pues el principal enemigo. Lo que abrirá el camino será el diseño de sistemas en que los q-bits sólo interaccionen entre ellos y no con el medio exterior, excepto en el momento de la medición (es decir, de la recuperación de la información). Desde este punto de vista, ciertos físicos dan muestras de pesimismo.[5] Según ellos, nunca se sabrá reducir la decoherencia hasta el punto en que se puedan ejecutar más de algunas etapas consecutivas de un proceso de cálculo cuántico. Otros investigadores, más optimistas, estiman que los ordenadores cuánticos fiables serán una realidad dentro de algunos años, o más bien dentro de unos decenios. Es posible que esto sea tomar los deseos por las realidades; pero el hecho es que el optimismo, por ingenuo que sea, tiende a hacer avanzar las cosas y a llegar a su consecución. Por ejemplo, todo el mundo estaba de acuerdo con la «verdad científica» de que ningún objeto más pesado que el aire podría volar jamás.

Por esto, varios experimentadores persisten en su proyecto. El reto, tal como está planteado actualmente, no es realmente la consecución de un ordenador cuántico, sino más bien pasar de los experimentos de observación de fenómenos cuánticos a experimentos para saber *controlar y manipular* estos fenómenos. Éste es el primer paso del camino orientado a realizar puertas lógicas cuánticas.

Por tanto, ¿seremos capaces de controlar y manipular los fenómenos de la naturaleza a la escala del átomo individual o del fotón aislado? Sí, pero hasta cierto punto. Así, en los experimentos de electrodinámica cuántica en cavidad, efectuados por Serge Hariche, Jean-Michel Raimond y sus colaboradores, en la Escuela normal superior de París, han podido controlar indirectamente átomos empleando fotones individuales, atrapados en pequeñas cavidades superconductoras.[6] Otro enfoque, explorado por Christopher Monroe, David Wineland y sus colaboradores del National Institute of Standards and Technology (NIST) en Boulder (Colorado, Estados Unidos), utiliza iones atrapados en una trampa de radiofrecuencia.[7] Los iones interaccionan intercambiando excitaciones vibratorias y cada ion puede ser controlado individualmente por medio de un haz láser de enfoque y polarización adecuados.

La actividad teórica o experimental en el campo del cálculo cuántico está adquiriendo una importancia cada vez más destacada en todo el mundo. Se están imaginando nuevas tecnologías orientadas a la posibilidad de realizar ordenadores cuánticos y se descubren y estudian nuevas modalidades de cálculo cuántico, superiores desde todo punto de vista a los cálculos clásicos. Tenemos la convicción de que algunas de estas propuestas resultarán fecundas en el plano tecnológico. El primer ordenador cuántico verá la luz mañana, dentro de un año o dentro de varios siglos, nadie lo sabe. Pero sea cuándo sea, lo cierto es que, desde ahora, se ha franqueado un gran paso conceptual.

**A.B. *et al.*** ■

(II) «Una nueva definición de la mecánica cuántica», nº 163, diciembre 1995.

(5) R. Landauer, *Trans. R. Soc. London*, A 353, 367, 1995.

(6) P. Domokos *et al.*, *Phys. Rev.*, A 52, 3.554, 1995.

(7) C. Monroe *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 75, 4.714, 1995.

***Para más información***


■ A. Barenco, «Quantum physics and computers», en *Contemporary Physics*, agosto, 1996.

■ A. Ekert y R. Josza, «Quantum computation and Shor's factoring algorithm», *Review of Modern Physics*, julio 1996.

■ D. Deutsch, *The fabric of Reality*, Viking Penguin Publishers, por aparecer en 1997.

■ En Internet, un punto de partida cómodo es: http://eve.physics.ox.ac.uk/QChome.html


# EL ORDENADOR CUÁNTICO: ¿SUEÑO O PESADILLA?

Serge Haroche y Jean-Michel Raimond

## Advertencia de dos físicos contra unas esperanzas que consideran excesivas

**SERGE HAROCHE** y **JEAN-MICHEL RAIMOND** son profesores de física en la Escuela normal superior de Paris y en la Universidad Pierre-et-Marie-Curie (Paris-IV). Los dos son miembros del Instituto universitario de Francia. Este texto ha sido traducido y adaptado del artículo «Quantum computing: dream or nightmare?», publicado en agosto de 1996 en la revista mensual norteamericana *Physics Today*.

**Ciertos investigadores estiman irrealizable la idea de un ordenador cuántico con el estado actual de nuestros conocimientos. Para ellos, las promesas están en otra parte: aportar una luz a las cuestiones fundamentales planteadas por esta física que tanto contradice nuestra intuición.**

La idea de aplicar a los ordenadores el principio de superposición de estados, esta propiedad tan sorprendente que tienen los sistemas cuánticos, se bosquejó hace unos quince años. Diversos avances recientes —como el algoritmo cuántico de factorización de los números desarrollado por Peter Shor, así como varios experimentos de manipulación fina de estados atómicos— han contribuido a hacer del «cálculo cuántico» un tema de actualidad.[1,2]

El entusiasmo nos parece justificado, pero no necesariamente por las razones generalmente invocadas. La idea de una informática cuántica plantea, a los físicos, un cierto número de cuestiones nuevas y apasionantes, relativas especialmente a la imperceptible frontera que separa el mundo clásico del mundo cuántico. Pero en lo referente a la realización de cálculos a gran escala gracias a los principios cuánticos, pensamos que permanecerá, en el futuro previsible, en el mundo de los sueños. Frente a ciertas promesas irrealistas de aplicaciones prácticas en un campo en que ya se han formulado tantas previsiones excesivas, estimamos necesario formular una advertencia. A este propósito, hay que recordar las grandes esperanzas suscitadas hace algunos años por los ordenadores ópticos y los de efecto Josephson.

Recordemos que el componente de base de un ordenador cuántico es una «puerta lógica» elemental, que implica la interacción de dos q-bits: un bit «de control» y un bit «objetivo». Como en una puerta lógica clásica, el bit de control permanece inalterado durante la activación del componente, pero su estado determina la evolución del bit objetivo: si el bit de control está en el estado $|0\rangle$, el objetivo no se altera; pero si el estado del bit de control es $|1\rangle$, el bit objetivo

sufre una transformación definida de manera precisa.

Contrariamente a la situación clásica, la mecánica cuántica permite también que el estado inicial del bit de control esté en una superposición coherente de los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$. En este caso, el estado cuántico final de la puerta lógica (es decir, el estado que describe el sistema control + objetivo) es un estado que se llama encabrestado. Esto significa que los dos q-bits se encuentran fuertemente correlacionados en un estado no separable, análogo al de los pares de partículas implicadas en la famosa paradoja Eisntein-Podolsky-Rosen.[1] La superposición de los q-bits de entrada y el encabrestamiento de los estados de salida son precisamente los rasgos fundamentales que distinguen este tipo de dispositivos de las puertas lógicas clásicas y ofrecen, al menos en teoría, un potencial de cálculo mucho más rico.

Diversos experimentos realizados en estos últimos tiempos con la ayuda de iones en trampas, o de átomos y de fotones confinados en el interior de cavidades, han presentado todas las características necesarias para una puerta cuántica. En estos experimentos, los estados atómicos o los estados del campo electromagnético pueden esquematizarse como q-bits, es decir, como sistemas cuánticos de dos niveles. Al hacer que interaccionen entre ellos, sobre los q-bits pueden efectuarse la mayoría de operaciones previstas.

Pero si el funcionamiento de una sola puerta lógica cuántica no presenta dificultades fundamentales, no sucede lo mismo cuando se considera el funcionamiento de un ordenador, en el que deberían combinarse una gran cantidad de componentes elementales. Para efectuar sus cálculos, la máquina debería utilizar superposiciones coherentes de un gran número de estados cuánticos. Ahora bien, este escenario implica que la máquina esté perfectamente aislada del mundo exterior, puesto que la coherencia cuántica es extremadamente sensible al acoplamiento con el entorno. Esta dificultad ya ha sido señalada en un gran número de estudios. Una perturbación debida a la interacción con el medio ambiente, que afectase a uno de los q-bits, sería suficiente para reducir a la nada la coherencia necesaria para el cálculo.

Un argumento simple nos permitirá comprender la magnitud del problema. Llamemos $T$ al tiempo durante el cual el estado de un q-bit puede mantenerse estable y no perturbado. Si $t$ designa el tiempo que emplea una puerta lógica para ejecutar su operación, la relación $R = T/t$ podrá servir para definir el grado de eficacia del hipotético ordenador. Para que el cálculo sea posible con una probabilidad de éxito razonable, $R$ debe ser de un orden de magnitud que corresponda al número de q-bits, multiplicado por el número de operaciones elementales.

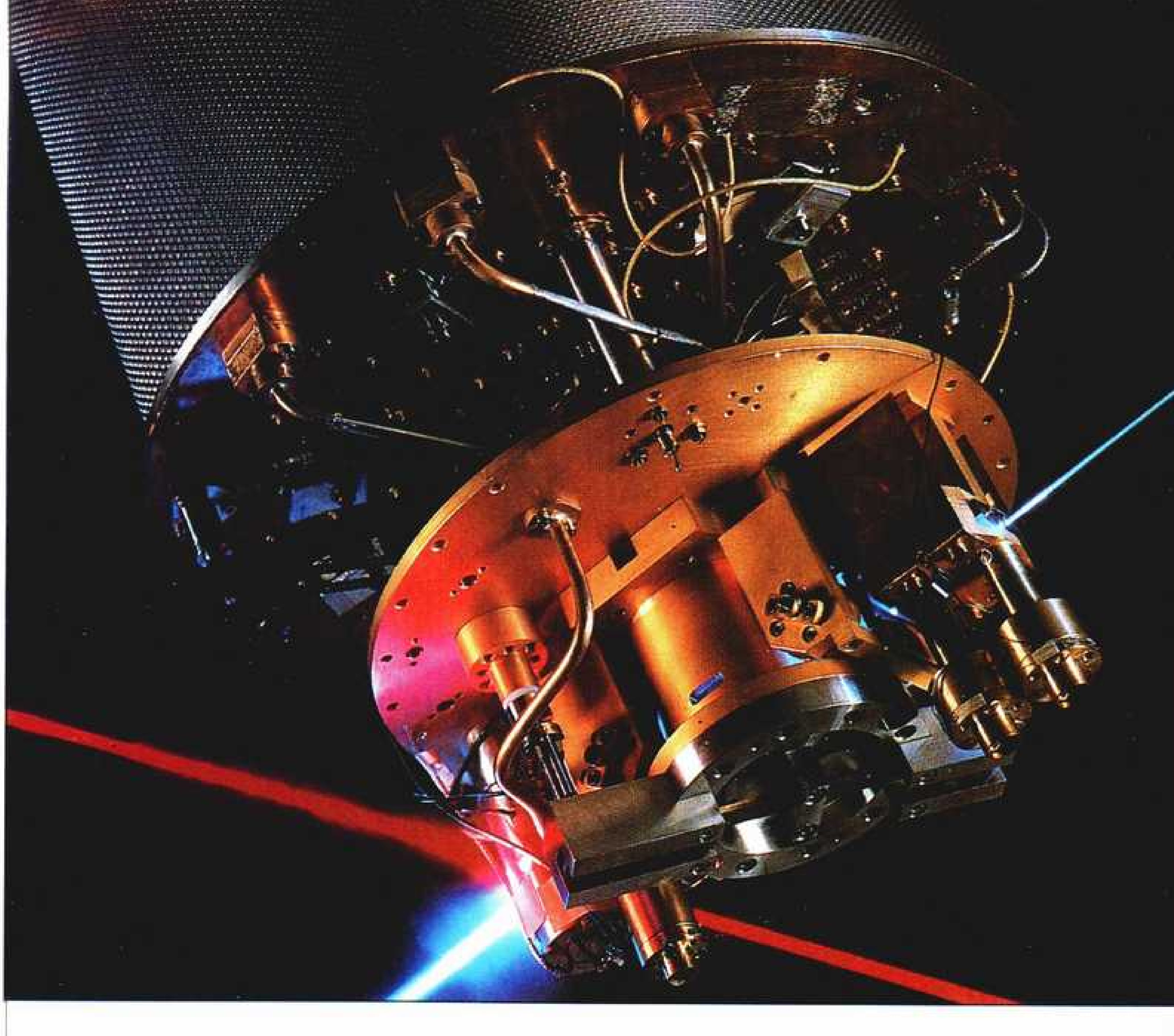
Tomemos, por ejemplo, el caso de una aplicación ridículamente modesta del algoritmo de factorización de Shor: la factorización de un número constituido por 4 bits (es decir, un número inferior a $2^4 = 16$). El cálculo necesitaría 20.000 operaciones elementales que implicarían 20 q-bits. Por tanto, el valor de $R$ debería ser superior aproximadamente a 400.000, cifra muy optimista con relación a los mejores dispositivos de óptica cuántica que disponemos actualmente. ¿Y qué puede decirse de una tarea más útil, como por ejemplo la factorización de un número de 400 bits? En este caso, $R$, que es proporcional por lo menos a la tercera potencia del número que debe factorizarse, debería ser del orden de $4 \times 10^{11}$. Si $t$ vale una décima de milisegundo, como en el caso del sistema de trampa de iones realizado recientemente por el equipo de David Wineland en Estados Unidos, sería necesario que la estabilidad $T$ del estado del q-bit fuese del orden de un año.

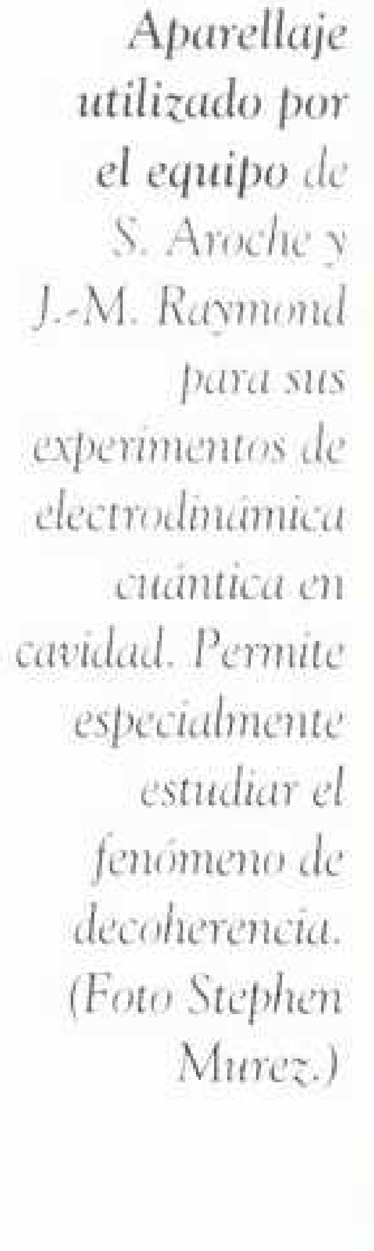
Según los optimistas, estas exigencias no deberían disuadirnos para seguir adelante. Después de todo, dicen, se han realizado unos progresos enormes entre la máquina de Pascal y el procesador Pentium y, disponiendo de dinero, las posibilidades de la tecnología son infinitas. Sin embargo, en este punto de vista se sobreentiende que $t$ y $T$ puedan ajustarse de manera independiente en direcciones opuestas, y éste no es el caso de los sistemas que conocemos actualmente. La interacción que acopla los q-bits entre ellos genera su propio ruido, el cual perturba los q-bits de manera aleatoria.

**«La tarea más ambiciosa que puede esperarse será la factorización del número 15»**

En la puerta cuántica del tipo trampa de iones, por ejemplo, el q-bit es representado por dos subestados de nivel de energía fundamental de un ion. Pero la transformación del q-bit se efectúa mediante un proceso, provocado por láser, que implica una transición virtual del ion a un nivel excitado, cuya duración de vida es muy corta. Si la duración de esta transición virtual se reduce aumentando la potencia del láser, también aumentará la posibilidad de una transición real no deseada del ion al estado excitado, seguida de una desexcitación espontánea que destruirá la coherencia cuántica del bit considerado. Por lo tanto, es imposible reducir $t$ sin disminuir también $T$.

De esta manera, se puede demostrar que, cualquier que sea la potencia del láser, el valor de $R$ para una puerta de tipo de trampa de iones no puede superar mucho el valor aproximado de $3 \times 10^6$ (un límite fundamental impuesto por la teoría de las interacciones luz-átomos). Por consiguiente, si no se hace nada para corregir la decoherencia, la tarea más ambiciosa que podrá esperar-





*Aparellaje utilizado por el equipo de S. Aroche y J.-M. Raymond para sus experimentos de electrodinámica cuántica en cavidad. Permite especialmente estudiar el fenómeno de decoherencia. (Foto Stephen Murez.)*

*Mundo Científico* ha publicado
(1)
«Las sorprendentes predicciones de la mecánica cuántica», nº 65, enero, 1987.

(1)
C.H. Bennett, «Quantum information and computation», *Physics Today*, octubre 1995.
(2)
«Labs demonstrate logic gates for quantum computation», *Physics Today*, 21, marzo 1996.

se de un ordenador cuántico que funcione sobre estos principios será la factorización de un número de cuatro bits, es decir, de un entero no mayor de 15.

Se puede caer en la tentación de objetar que los sistemas cuánticos macroscópicos, como los metales superconductores o los condensantes de átomos obtenidos recientemente por diversos equipos en todo el mundo, no son destruidos por la decoherencia. ¿Por qué los ordenadores cuánticos serían pues tan vulnerables? Porque en ellos hay una diferencia fundamental. Los condensantes macroscópicos, incluso si contienen un elevado número de partículas, constituyen un estado cuántico *único*, cuyo contenido en información es necesariamente nulo. En cambio, en una hipotética máquina cuántica, los q-bits podrían estar superpuestos en un gran número de estados diferentes. Un registro de un millar de q-bits, por ejemplo, podría implicar una superposición de $2^{1.000}$ (es decir, $10^{300}$) estados y la coherencia entre todos estos estados debería mantenerse durante millones de operaciones. La manipulación de un monstruo cuántico como éste sería una empresa tan difícil como la que permitiese mantener el célebre gato de Schrödinger en una superposición de sus estados vivo y muerto.[II]

Recientemente, se han avanzado ciertos dispositivos ingeniosos para evitar este problema de decoherencia. Emplean diversas estrategias de «vigilancia» basados en el siguiente razonamiento; como los procesos de emisión espontánea actúan al igual que los virus mortales, detectémoslos y corrijamos sus efectos para restablecer la coherencia cuántica cuando ésta sea destruida. Todos estos sistemas se basan en la utilización de informaciones redundantes. En lugar de hacerlo con bits únicos, la codificación de los valores 0 y 1 se haría en forma de estados cuánticos encabrestados, formados con la ayuda de tres q-bits o más. En caso de alteración de uno de los bits, el accidente sería detectado inmediatamente y luego corregido. Pero para un número elevado de partículas, estos estados encabrestados son tan difíciles de preparar, que nadie lo ha logrado todavía.

La sola preparación de estos estados constituirá una verdadera hazaña experimental y dará lugar a importantes puestas a prueba de la mecánica cuántica. E incluso si los progresos técnicos permitiesen un día realizar normalmente estos estados en el laboratorio, cualquier error del sistema de vigilancia (es decir, si la eficacia de la detección es inferior al 100 %), se traducirá en una pérdida de coherencia y, cualquier imperfección en la serie de operaciones necesarias para controlar el sistema, no hará más que añadir nuevos errores. Por tanto, pensamos que es oportuno decir que, a menos que aparezcan nuevos descubrimientos físicos inesperados, la aplicación de códigos de error será, más allá de algunas puertas, extremadamente difícil. Desde este punto de vista, la máquina cuántica de gran envergadura, aunque haga soñar a los informáticos, será una verdadera pesadilla para los experimentadores.

Pero si bien el ordenador cuántico de gran envergadura todavía es irrealista ¿por qué no se puede pensar en construir primero uno pequeño, que sólo contuviera algunas docenas de q-bits? Como estos ordenadores obedecerían a las leyes de la lógica cuántica, estarían, según Seth Lloyd del MIT, particularmente bien adaptados para calcular el comportamiento de un sistema de espines cuánticos que contuviera tantas partículas como q-bits tuviera el ordenador.[3] Esto conduciría a simular un sistema físico mediante una copia artificial de este sistema, que obedecería a las mismas ecuaciones. Sin embargo, mucho dudamos que existan problemas de espines cuyo análisis requiera una simulación tan difícil. ¿Por qué no dedicarse al estudio directo del sistema de espines considerado? Cuando sólo entrarían en juego un número de partículas pequeño, el trabajo podría efectuarse con ordenadores clásicos y, por tanto, el interés del cálculo cuántico desaparece.

Sin embargo, aunque la informática cuántica permanezca en el mundo de los sueños, esto no quiere decir que los problemas físicos asociados al tratamiento de la información cuántica, al nivel de algunos q-bits, dejen de ser apasionantes. Los experimentos efectuados sobre los estados encabrestados de átomos o de iones en trampas, nos esclarece sobre la naturaleza profunda de los procesos de interacción con un instrumento de medida. También deberían conducir a una espectroscopia todavía más precisa de los sistemas cuánticos sencillos.

Las estrategias descubiertas últimamente para controlar en parte los efectos de la decoherencia que, todavía recientemente, habrían sido consideradas como imposibles, permiten hacer progresar en gran medida nuestra comprensión de la disipación en los sistemas mesoscópicos, situados en la frontera entre la física clásica y la física cuántica. El estudio de la decoherencia cuántica mediante experimentos conceptualmente sencillos también es una tarea importante y un reto. En lugar de hacernos saber cómo fabricar un ordenador cuántico de gran tamaño, es más probable que estos experimentos nos informen sobre los procesos que harían desechar definitivamente esta empresa.

**S.H y J.-M.R.** ■

(II) «Erwin Schrödinger: un filósofo entre los físicos», nº 111, marzo, 1991.

(3) S. Lloyd, «Quantum-mechanical computers», *Scientific American*, octubre 1995.

# INSTRUMENTOS DE LOS HOMÍNIDOS DE ATAPUERCA

Eudald Carbonell, Andreu Ollé, Xosé Pedro Rodríguez, Robert Sala y Josep Mª Vergès

## Las primeras comunidades humanas

**EUDALD CARBONELL ANDREU OLLÉ XOSÉ PEDRO RODRÍGUEZ ROBERT SALA JOSEP Mª VERGÈS** pertenecen al Área de Prehistoria de la Universitat Rovira i Virgili, de Tarragona. Unidad Asociada al CSIC. Correo electrónico: ecr@astor.urv.es/ paelo@astor.urv.es

**En los últimos años la polémica científica sobre el primer poblamiento de Europa se ha polarizado entre los partidarios de la «Europa joven», que definen un poblamiento no anterior a los 500.000 años, y los que opinan que el poblamiento de este continente fue muy anterior. Las investigaciones en Atapuerca han sido definitivas para establecer la presencia de homínidos, procedentes de África, en Europa hace al menos un millón de años.**

En los últimos años el origen del poblamiento de Europa se ha convertido en uno de los temas más candentes entre los investigadores que estudian las primeras comunidades humanas.

Hasta el hallazgo, en 1994, de los fósiles humanos del nivel 6 del yacimiento de Gran Dolina (Sierra de Atapuerca, Burgos), los restos de homínidos más antiguos descubiertos en Europa no alcanzaban los 500.000 años de antigüedad. Entre éstos destacan como fósiles paradigmáticos la mandíbula de Mauer, en las cercanías del río Nekar (Alemania), y el cráneo de Aragó, en Tautarel (Francia). Estos fósiles y otros de parecida antigüedad, como la tibia de Boxgrove (Inglaterra), confirmaban la presencia humana en Europa en un momento avanzado del Pleistoceno medio (periodo que se extiende entre 780.000 y 120.000 años).

Sin embargo, la exhumación de instrumentos líticos en el continente europeo, en terrazas fluviales, cuevas y antiguas cuencas lacustres, atribuidos al Pleistoceno inferior (entre 1.600.000 y 780.000 años), parecía indicar la existencia de un poblamiento claramente anterior a los 500.000 años. De esta manera quedaba abierta la posibilidad de hallar en el futuro registro paleontológico de homínidos del Pleistoceno inferior. No obstante, una buena parte de la comunidad científica se mostraba altamente excéptica ante este planteamiento, y ponía en duda la antigüedad de estos instrumentos líticos y en algunos casos incluso su carácter antrópico. Estos investigadores remontaban el primer poblamiento de Europa a una datación en torno a los 500.000 años, apoyándose exclusivamente en los restos humanos conocidos hasta entonces. En consecuencia, habían dos corrientes de opinión acerca del momento en que los homínidos llegaron por vez primera a Europa: por una parte, los partidarios de la «Europa joven», que defendían un poblamiento no anterior a los 500.000 años; y, por otra, los partidarios de lo que podríamos llamar la «Europa madura», que defendían un poblamiento netamente anterior, que podría situarse en torno al millón de años, enraizado en el Pleistoceno inferior.[1]

Esta polémica científica quedó zanjada cuando en julio de 1994 fueron descubiertos restos humanos asociados a instrumentos líticos y fauna en el nivel 6 del yacimiento de Gran Dolina.[2] Su antigüedad de más de 800.000 años no dejaba duda de la ocupación de nuestro continente por bandas de homínidos procedentes de África, al menos desde el Pleistoceno inferior final. Lo que hasta ese momento tan sólo era una hipótesis se había convertido en una realidad tangible.

En este artículo no nos centraremos en las investigaciones que se han realizado a nivel paleontológico, sino en mostrar la evolución de los instrumen-



*Figura 1.* ***La construcción del ferrocarril minero*** *que unía las poblaciones de Monterrubio de la Demanda y Villafría, a finales del siglo XIX, puso al descubierto cavidades con rellenos del Pleistoceno medio e inferior. En la Trinchera del Ferrocarril se llevan a cabo excavaciones arqueopaleontológicas en los yacimientos de Galería (en primer término) y Gran Dolina (al fondo).*

(1) E. Bonifay, B. Vandermeersch (eds.) *Les Premiers Européens*, Editions du comité des Travaux Historiques et Scientifiques, París, 1991. W. Roebroeks, T. Van Kolfschoten (eds.) *The Earliest Occupation of Europe*, University of Leiden, Leiden, 1995. E. Carbonell *et al.*, *Journal of Anthropological Research*, 52(1), 107, 1996.

(2) E. Carbonell *et al. Science*, 269, 826, 1995. J.M. Parés y A. Pérez González, *Science*, 269, 830, 1995.

tos líticos y caracterizar los factores que han intervenido en esta evolución a partir del Pleistoceno inferior y durante el Pleistoceno medio.

La elaboración de un sistema de análisis del registro lítico, constituye uno de los grandes objetivos que nuestro equipo se planteó a partir de los años 70. El punto de partida para que más adelante se pudiesen formular estructuras y conceptos que sustentaran nuestro enfoque debía ser inevitablemente la construcción de un cuerpo teórico que explicara los procesos de complejidad del registro arqueológico, tanto a nivel sincrónico como diacrónico. El planteamiento inicial de este sistema, denominado Lógico-Analítico, era introducir los factores espacio y tiempo en el análisis de los objetos. Un lenguaje analítico nos permitió ordenar lógicamente las diferentes fases, denominadas categorías estructurales, que conforman los procesos técnicos de fabricación de los objetos.[3]



*Figura 2. Los procesos tecnológicos, tanto a nivel sincrónico como diacrónico, se explican a partir de la relación existente entre los polos morfotécnico, morfopotencial y morfofuncional, y del peso específico que adquiere cada uno de ellos.*

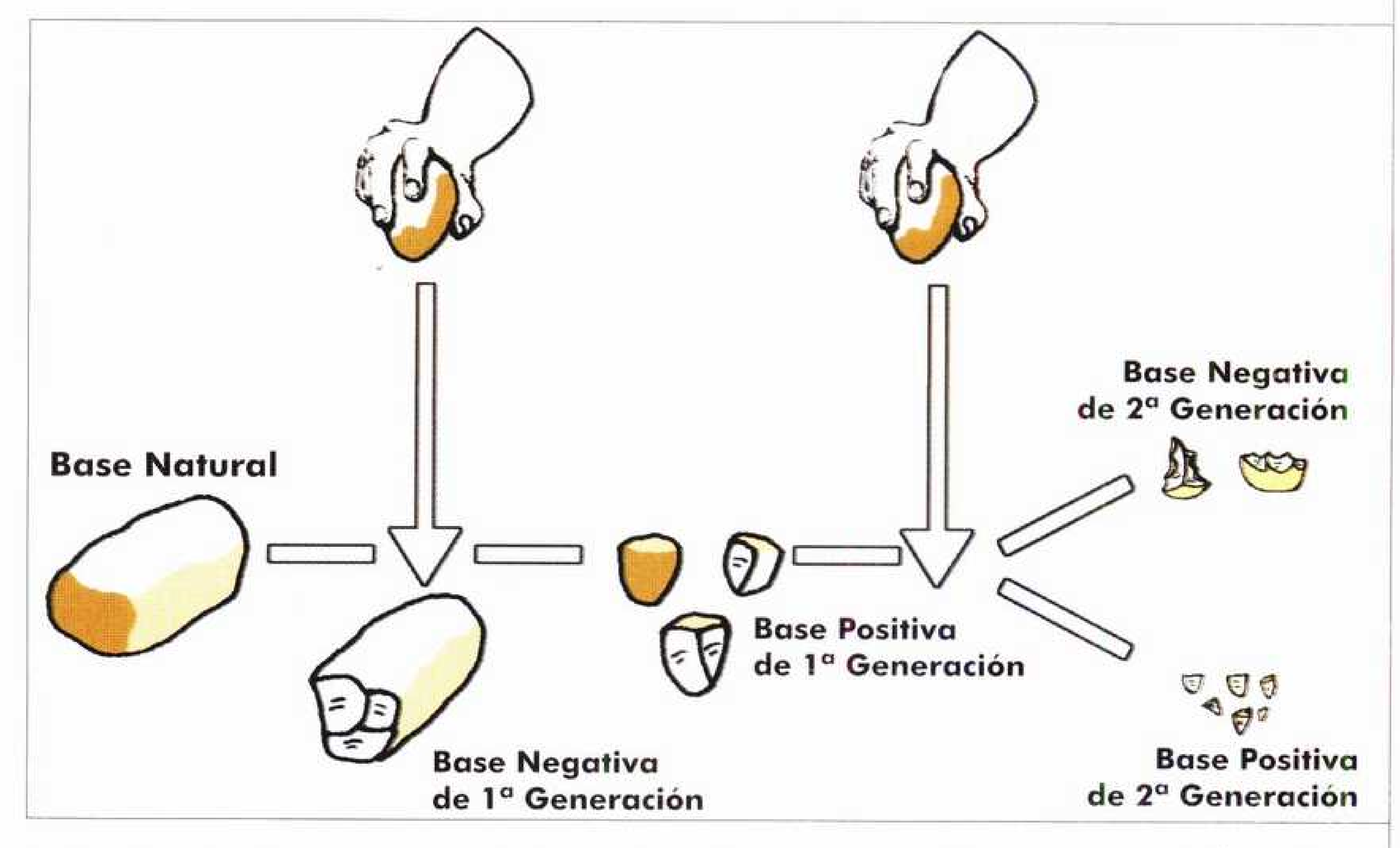



***Figura 3. Habiendo sido intervenida por el hombre**, la materia prima (Base natural, Bn) sufre una transformación. A causa de esta primera intervención de la Base natural (tiempo 1), aparecen dos categorías de objetos. Por una parte, la matriz inicial, que conserva uno o más negativos que corresponden a las extracciones realizadas; y, por otra, los productos que son el positivo de éstas. Así, hablamos de Bases Negativas de Primera Generación (BN1G) y de Bases Positivas de Primera Generación (BP1G). A medida que se va explotando la BN1G aparecen más BP1G, y si se interviene sobre ellas se inicia una nueva fase del proceso (tiempo 2). A causa de esta modificación, la antigua BP1G deviene Base Negativa de Segunda Generación, dando lugar a su vez a la aparición de BP2G. El proceso puede continuar con la aparición de una tercera generación de objetos. Categorías estructurales.*

Los objetos líticos son estudiados desde tres ópticas: la morfotécnica, la morfopotencial y la morfofuncional (fig. 2). El elemento morfotécnico es la materialización de una técnica determinada que da forma al instrumento. El sistema lógico analítico presenta una serie de categorías estructurales (fig. 3) que representan segmentos de un proceso *morfogenético* que no se puede comprender de forma aislada, sino teniendo en cuenta su interrelación. Estas categorías no constituyen una tipología, de manera que nos alejamos de los estudios tradicionales en Prehistoria para adentrarnos en el campo de la tecnología, en el cual hemos convergido con otras escuelas y movimientos.[4]

La utilización de un instrumento para alguna actividad obliga a poner en contacto dos superficies: la del objeto y la del material sobre el que se interviene. La superficie del objeto experimenta por tanto una interacción, que se materializa en una alteración que puede variar según la posición en que se ha utilizado, la dirección y la clase de material sobre el que se ha intervenido. Este elemento de estudio es denominado *morfofuncional*, es decir para qué y cómo fue utilizado en concreto el objeto. Cuando se utiliza un instrumento se jerarquiza parte de su superficie dependiendo de la actividad que se desea realizar. La superficie jerarquizada puede identificarse con diversos modelos geométricos: planos, diedros, triedros o pirámides. Cada uno de estos modelos geométricos tiene un potencial determinado, más o menos adecuado para efectuar diferentes actividades. Cuanto más se adecua el modelo a la eficacia en el uso del artefacto, más apto es el instrumento. Los modelos geométricos que representan la morfología de un objeto y su articulación en el uso, constituyen el elemento *morfopotencial*, es decir qué geometría de interacción de la superficie del instrumento es jerarquizada por el uso, independientemente de todas las posibilidades intrínsecas del mismo.

Por lo tanto, los elementos *morfotécnico*, *funcional* y *potencial* son la tríada que explica el cambio y transformación morfológica de los instrumentos líticos. A nivel diacrónico, el cambio de forma, de área de uso, así como el tipo de función, determinan que las morfogénesisis varíen y que exista un proceso de cambio, transformación y, en consecuencia, de aumento de la complejidad. Éste, determina varios modos técnicos o periodos que representarían nuevas formas de adaptación humana extrasomática.

Los primeros objetos de uso con manufactura humana se sitúan entre 2.500.000 y 1.600.000 años, en el continente africano. Estos artefactos, caracterizados por su escasa configuración y por la búsqueda de filos diédricos, se obtenían a través de métodos de talla aleatorios y con secuencias arquetípicas elementales. La variabilidad de rocas utilizadas es amplia y está sujeta sólo a su disponibilidad, resistencia y buena exfoliación. Estos instrumentos serían deshechados poco después de su utilización, dada la facilidad y rapidez de la fabricación de nuevos útiles. Estos atributos caracterizan al Olduvaiense (epónimo del lugar en Tanzania donde fueron definidos por primera vez), o Modo

**(3)**
E. Carbonell *et al.*, *Cahier Noir*, *1*, 3, 1983.
E. Carbonell *et al.* *Cahier Noir* 6, 1, 1992.

**(4)**
E. Boëda, *Techniques et Culture*, *17-18*, 37, 1991.
J.M. Geneste, en *La grotte Vaufrey. Paléoenvironnement. Chronologie. Activités humaines*, Mém. Soc. Préhis. Fran. 441-517, París, 1988.
J. Jaubert, *Cahier Noir* **7**, 85, 1995.
C. Karlin, en *Tecnología y cadenas operativas*, Barcelona, Univ. Autònoma, 99-124, 1993.
P.J. Texier, H. Roche, *Cahier Noir*, *7*, 31, 1995.

I Biofuncional.[5] En Eurasia, este modo se localiza entre el millón y los trescientos mil años.

El Achelense, epónimo de Saint Acheul (Francia), o Modo 2 Biomorfotécnico, se documenta en África entre 1.500.000 y 300.000 años.[6] Se carateriza por la presencia de bifaces, hendedores, picos y, en general, por instrumentos de gran formato, con una alto grado de elaboración. Uno de los elementos característicos de estos objetos es su simetría. Los morfotipos o estándares de pequeño formato también están muy configurados. La explotación de Bases Negativas de Primera Generación se hace a partir de métodos de talla diversificados. La producción de morfologías complejas hace que los instrumentos no sean abandonados de forma inmediata después del uso, tal y como ocurría en el Modo 1. La búsqueda de triedros y pirámides es una constante en dichas morfologías. En Eurasia este periodo estaría comprendido entre los 500.000 y los 200.000 años.

Una característica importante que debemos señalar es el retraso aparente entre la aparición de estos modos en África y su presencia en el resto de los continentes.

**Atapuerca es un enclave especialmente propicio para el estudio de la evolución de los modos tecnológicos y su sucesión en el tiempo**

El Musteriense, o Modo 3, epónimo del famoso yacimiento de Le Moustier en la Dordoña (Francia), caracteriza a algunos de los conjuntos industriales de Europa a partir de los 300.000 años. Su singularidad estriba en una gran diversidad de objetos de uso de pequeño formato, producidos de forma estandarizada. En el continente africano, entre los 200.000 y los 40.000 años, se extiende como una mancha de aceite la denominada «Middle Stone Age», o Modo 3 africano, compuesta por utensilios de pequeño formato altamente elaborados.

En los yacimientos de la Trinchera del Ferrocarril de la Sierra de Atapuerca, localizados en rellenos cársticos que abarcan el espacio cronológico comprendido entre el millón y los 150.000 años, se han identificado los tres modos. Esta circunstancia convierte la Sierra de Atapuerca en un enclave especialmente propicio para el estudio de la evolución de los modos tecnológicos y su sucesión en el tiempo. Hasta la actualidad, han sido excavados el yacimiento de la Gran Dolina, con once niveles cuya cronología abarca desde cerca de 1.000.000 hasta los 150.000 años, y el denominado conjunto de la Galería, a 50 metros del anterior, con 22 niveles y cuya cronología oscila entre los más de 350.000 años de la base fértil del relleno y los 150.000 años de su parte superior.

El Modo 1 ha sido localizado en los niveles inferiores del yacimiento de Gran Dolina, concretamente en TD4, TD5 y TD6.[7] Su cronología es inferior al estadio isotópico 19, o sea, más de 800.000 años. Este registro se halla asociado a fauna y, en el nivel 6, a restos de homínidos (fig. 7). La mayoría de los instrumentos líticos recogidos en estos niveles inferiores estan producidos sobre cuarcitas procedentes del río Arlanzón (fig. 8). Sin embargo, en el nivel TD6, con cerca de 200 instrumentos recuperados hasta el momento, los tipos de rocas representadas son múltiples: sílex de origen neógeno, sílex de origen cretácico, cuarzo y caliza, además de la cuarcita ya citada.

El objetivo fundamental de los homínidos del Pleistoceno inferior de la Sierra

***Figura 4. Situación de algunos de los yacimientos mas significativos*** *del Pleistoceno inferior y medio europeo.*

***Figura 5. Proceso de excavación*** *de un registro arqueológico generado por ocupaciones de tipo esporádico en la base de la unidad GIII de Galería.*

(5) M.D. Leakey, *Olduvai Gorge, vol. 3: Excavation in Beds I and II 1960-1963*, Cambridge, Cambridge University Press, 1971. N. Toth, K. Schick, *Advances in Archaeological Method and Theory*, 9, 1, 1986.

(6) J. Desmond Clark, en *Integrative Paths to the Past. Paleoanthropologic al Advances in Honor of F. Clark Howell*, editado por R.S. Corruccini and R.L. Ciochon, Englewood Cliffs (Nueva Jersey), Prentice Hall, 451-469, 1994.

(7) E. Carbonell, X.P. Rodríguez, *Journal of Human Evolution*, 26, 291, 1994.

**Figura 6. Muestra de los restos humanos** *localizados en el nivel TD6 de Gran Dolina. Estos fósiles pertenecen a la primera población humana conocida en Europa. (Foto: Museo Nacional de Ciencias naturales.)*

era obtener diédricos cortantes a partir de la explotación de rocas del río o del sílex. Estas materias primas de fácil acceso eran recogidas en un área de menos de 1 kilómetro alrededor de las ocupaciones. Los métodos de explotación para la obtención de Bases Positivas eran variados, pero destacaban tres. El primero de ellos consiste en la explotación en ángulos rectos y ortogonales entre sí, a partir de la cual se obtienen productos masivos. Este tipo de explotación da lugar a Bases negativas de Primera generación de morfologías cúbicas y poliédricas. Junto a este método arcaico aparecen con nitidez otros dos: la explotación unipolar recurrente (con extracciones realizadas en una sola dirección repetidamente) y la centrípeta (consistente en efectuar extracciones partiendo del pavimento del objeto en dirección hacia su centro).

Los tipos de configuración de algunas Bases negativas de Segunda generación, así como la convexidad plano-distal de parte de las Bases positivas son indicativas de un Modo 1 avanzado.

El Modo 2 ha sido localizado en el yacimiento de Galería, básicamente en los niveles comprendidos en las unidades GII y GIII; su cronología, basada en las series del uranio, oscila entre más de 350.000 y 150.000 años. Entre 1978 y 1995 han sido exhumados varios centenares de útiles líticos, realizados con los mismos tipos de rocas ya señalados para el nivel 6 de Gran Dolina, básicamente sílex y cuarcita.

Estos instrumentos se caracterizan no tan sólo por la obtención de modelos de filo diédrico, sino porque aparece con nitidez una serie de artefactos de gran formato bien configurados, típicos estándares del Modo 2, como bifaces, hendedores, picos, etc. (figs. 9 y 10). La singularidad de estos productos está ligada a su versatilidad en el uso. La producción de instrumentos que presentan potenciales técnicos o asociaciones de diedros y triedros de gran formato, así como modelos de tipo piramidal, da a esta industria una complejidad operativa mucho mayor que la del Modo 1. Normalmente estos estándares operativos son configurados en el exterior del Centro de Intervención y trasladados para efectuar alguna actividad en ocupaciones de corta duración, en las zonas de campamento en cueva o al aire libre. No se han localizado Bases negativas de Primera generación de gran formato en sílex neógeno ni tampoco cantos de río de medio y gran formato para explotar. Como ya hemos dicho, estas actividades

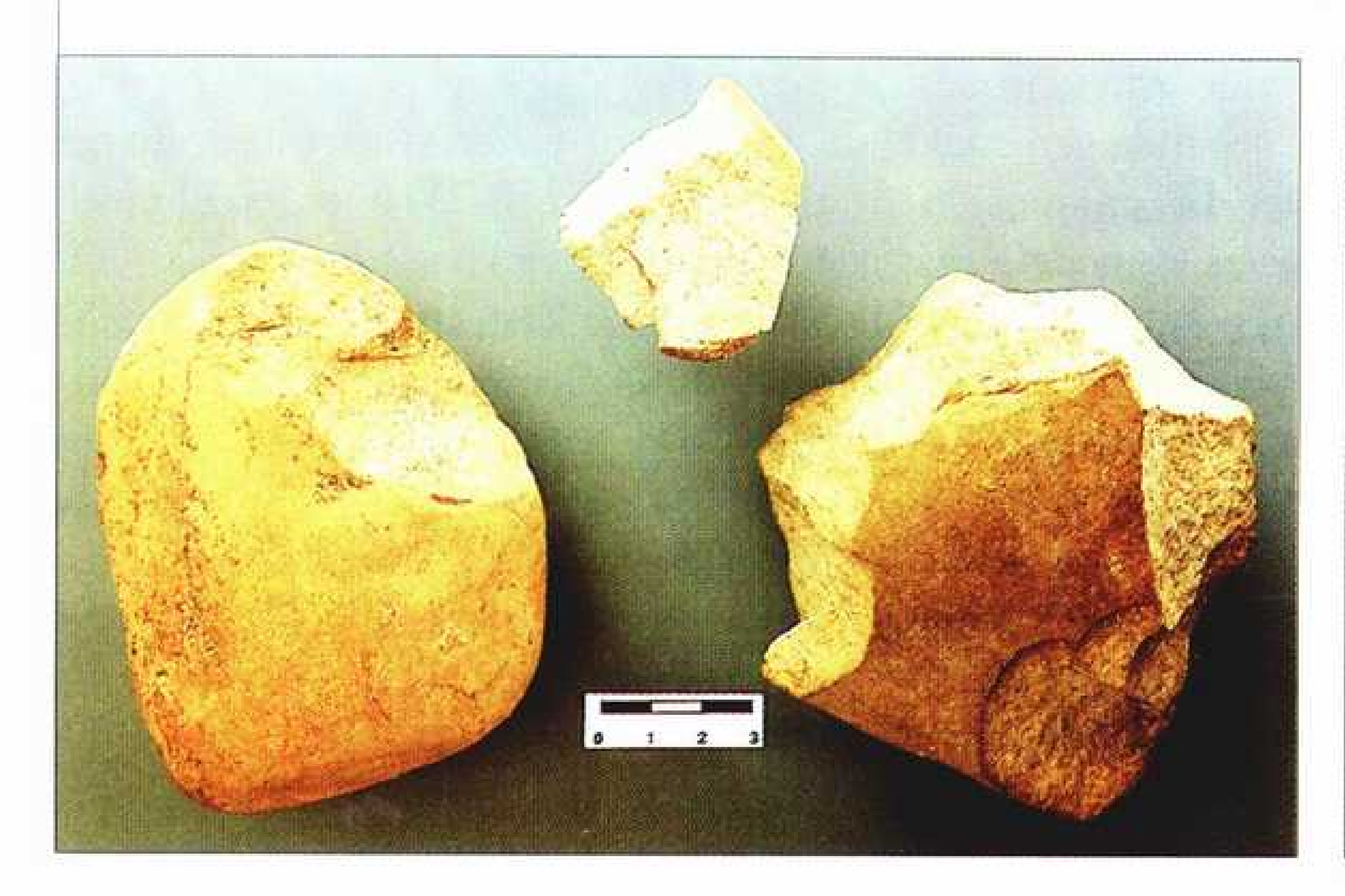






**Figura 7. Muestra de objetos procedentes del yacimiento** *de Gran Dolina con un sistema técnico de Modo 1, Olduvaiense o Biomorfofuncional. A la izquierda una BN1G sobre canto de caliza, con escasas extracciones realizadas en una sola de sus caras (unifacial), recuperado en el nivel TD6 . En el centro una Base positiva de cuarcita, procedente del nivel TD4 . A la derecha una BN1G de cuarcita tallada en casi toda su periferia, descubierta en el nivel TD5 . La antigüedad de estos instrumentos supera los 780.000 años.*

**Figura 8. Objetos fabricados con una tecnología** *de Modo 2 o Achelense (Periodo Biomorfotécnico), procedentes del yacimiento de Galería. Su datación se sitúa en torno a los 300.000 años. A la izquierda un pico de cuarcita (BN1G); en el centro un bifaz de sílex y a la derecha un hendedor de cuarcita, ambos BN2G.*




***Figura 9. Bifaz de cuarcita** (BN2G) del nivel TG10-B de Galería (Unidad GII) en el momento de su descubrimiento.*

se llevarían a cabo en el exterior. Los grandes formatos están asociados a instrumentos configurados (BN2G) de tamaño pequeño y mediano y a Bases Positivas que presentan un espectro muy variable. Junto a éstos, aparecen abundantes cantos rodados, utilizados como percutores tanto en la producción de artefactos líticos como en las cadenas de fracturación ósea para la obtención de la médula de huesos largos de herbívoros.

La mayoría de estos instrumentos, procedentes de las unidades GII y GIII de Galería, se encuentran asociados a niveles de ocupación de corta duración dedicados al aprovechamiento de cérvidos, équidos y bóvidos.[8]

## El análisis y exploración de microestructuras nos acercan a la función de algunos de los utensilios exhumados

El Modo 3 está representado en los niveles superiores de la Gran Dolina (TD10 y TD11). Su cronología no ha podido ser obtenida por métodos isotópicos, pero los micromamíferos contenidos en estos niveles fosilíferos permiten atribuirles una antigüedad entre 300.000 y 150.000 años. Hasta el momento se han recuperado en estos niveles más de mil piezas líticas. Estos objetos se fabrican con sílex y con cantos procedentes de las terrazas y del cauce del río Arlanzón. Las materias brutas, selecionadas del entorno próximo de la Sierra y de las llanuras aluviales, están representadas en diferentes proporciones, siendo las más frecuentes el sílex de origen neógeno, la cuarcita y el sílex de origen cretácico. Se han identificado diversos sistemas de talla para la obtención de Bases positivas; los más comunes son estrategias centrípetas y polarizadas que poseen la propiedad de mezclarse dependiendo de la fase de reducción en que se encuentren. Ello indica una gran flexibilización de los procesos de talla y alta capacidad de adaptación a cada momento concreto del proceso de producción. El sílex de origen cretácico es muy aprovechado, siendo configurados sus productos positivos. El sílex de origen neógeno es captado en lugares cercanos, a partir de la fracturación de grandes bloques; luego es trasladado a los Centros de intervención en formatos de Bases negativas que ya han sido inicializadas en los puntos de abastecimiento de materia prima, de manera que en el interior sólo se realizan los procesos de reducción propios de la configuración o de la explotación final.

En la Sierra de Atapuerca el modo 3 se caracteriza fundamentalmente por la producción estandarizada de configurados de segunda generación de pequeño formato. La producción de diedros y triedros es el modelo más generalizado para los potenciales morfodinámicos de estos niveles de la Gran Dolina. Son poco frecuentes, al menos por ahora, las Bases positivas de gran tamaño, diferenciándose por lo tanto del Modo 2. Aunque en el nivel 11 de este yacimiento estas industrias líticas provienen de ocupaciones puntuales del carst, no ocurre lo mismo con alguna de las ocupaciones de mayor impacto en el nivel 10, donde es posible que sean el resultado de ocupaciones centrales, de áreas que han sido utilizadas como campamentos, y en donde se han efectuado actividades complejas que reflejan las costumbres y modos de vida de estas comunidades.

En este sentido, el registro documentado en los conductos cársticos de la Trinchera del Ferrocarril es el resultado de diferentes tipos de ocupación durante el Pleistoceno inferior y medio. Analizando el registro mediante una serie de categorías discriminantes, hemos podido diferenciar, a grandes rasgos, dos tipos de ocupación, aunque es segura la existencia de muchos otros.

En los niveles TD6, con más de 800.000 años de antigüedad, y TD10, con más de 250.000, el espacio ha funcionado como campamento central (o Centro de Intervención Referencial). A esta conclusión se ha llegado tras constatar, en el abundante registro arqueopaleontológico, los siguientes fenómenos, indicadores de una amplia gama de actividades: ausencia de marcas de mordeduras en huesos, que indica baja actividad de carnívoros; alta proporción de material lítico respecto al óseo; representación de todas las etapas del proceso de producción de instrumentos (Bases naturales, Bases negativas de 1ª generación, Bases negativas de 2ª generación Bases positivas); presencia de marcas de corte en los huesos, así como de fracturación para extraer la médula.

En cambio, en los Centros de Intervención Esporádicos hay una menor presencia de registro arqueopaleontológico, caracterizado por la baja proporción de instrumentos líticos en relación a los restos faunísticos. Las cadenas de producción de instrumental están representadas de forma fragmentaria, generalmente con ausencia de las fases iniciales de los procesos de talla. El impacto de los carnívoros en los huesos es alto, mientras que las marcas de corte son muy escasas. Esta composición del registro indica que en el nivel está representado un segmento medio de ocupaciones especializadas y de impacto mediano, que por ahora resulta difícil de definir. Esta pauta ha sido reconocida en Galería GII y GIII, entre más de 350.000 y 150.000 años, en el nivel TD11 de Gran Dolina, con 200.000 años, y en TD5 y TD4, entre 800.000 y 1.000.000 de años.

A esta caracterización han contribuido los análisis funcionales que se han llevado a cabo sobre instrumentos líticos

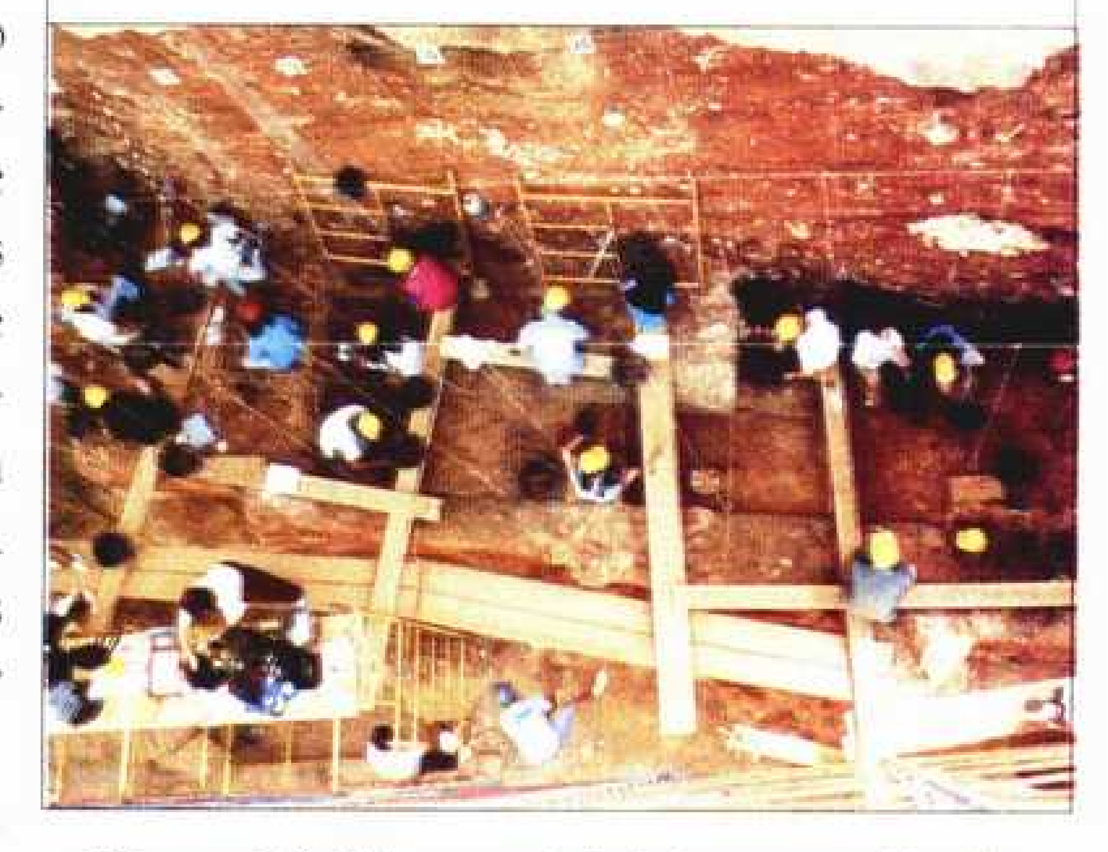


***Figura 10: Vista cenital** de la excavación de los niveles basales (GII) de Galería.*

(8) J.C. Díez, V. Moreno, *Bolet. del Seminario de Estudios de Arte y Arqueología*, LX, 9, 1994. E. Carbonell *et al.*, *Cahier Noir*, 7, 41, 1995.

(*) Agradecemos la colaboración y ayuda constantes de nuestros compañeros del Área de Prehistoria de la Universitat Rovira i Virgili, así como del equipo de Juan Luis Arsuaga (Dpto. de Paleontología de la Universidad Complutense) y José María Bermúdez de Castro (Dpto. de Paleobiología del Museo Nacional de Ciencias Naturales).

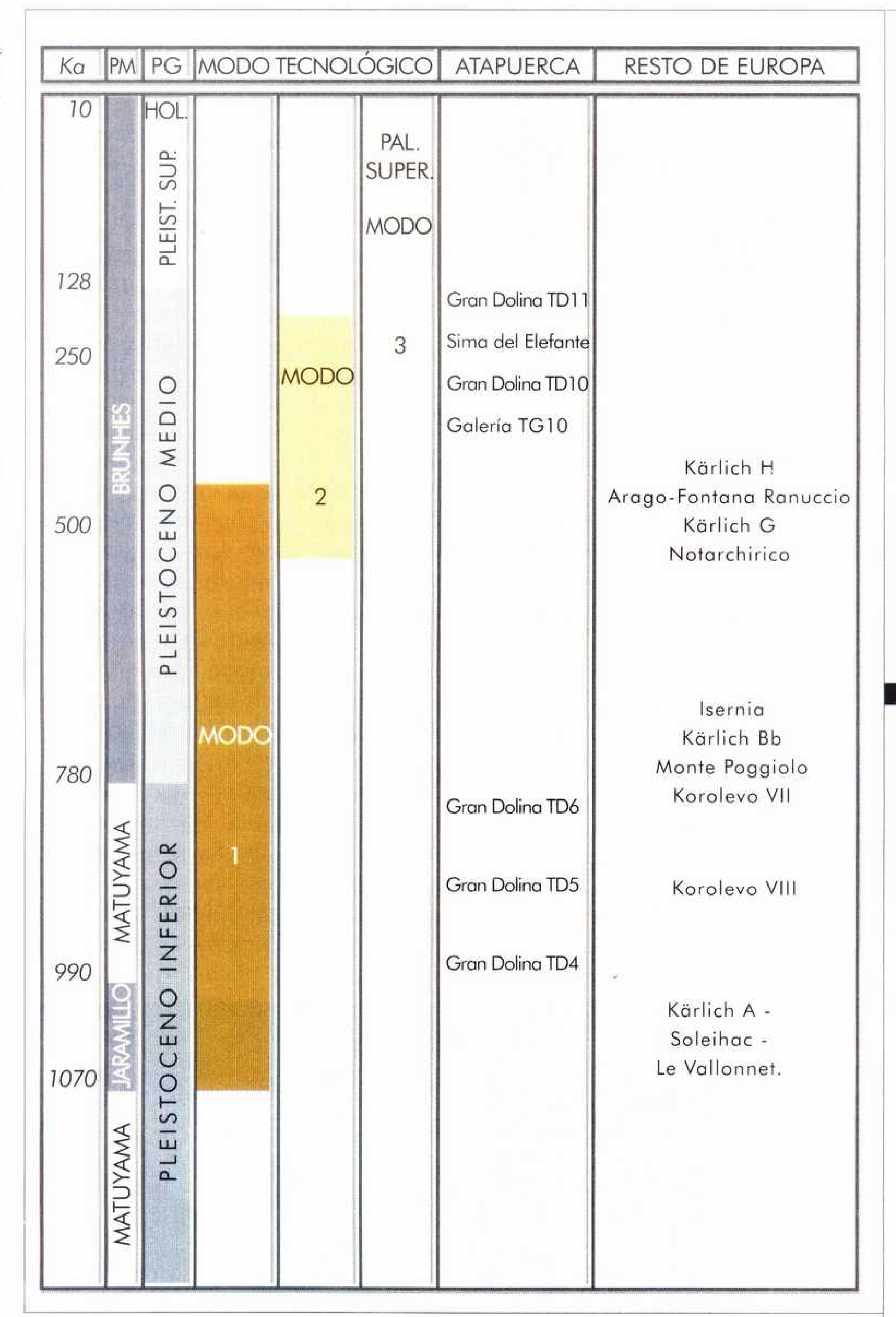



*Figura 11.* ***Esquema cronológico de la sucesión*** *de los modos tecnológicos de fabricación de instrumentos líticos, con algunos de los yacimientos de la Sierra de Atapuerca y del resto de Europa.*

del Modo 2 y 3 de los yacimientos de la Sierra de Atapuerca. La utilización de la microscopia electrónica, así como de diferentes métodos de análisis y exploración de microestructuras, nos han acercado a la función de algunos de los utensilios exhumados. La técnica utilizada se basa en la identificación y caracterización de las deformaciones sufridas por las zonas activas durante el proceso de trabajo. La interpretación de los fenómenos observados en el material arqueológico parte de la analogía con series experimentales, permitiéndonos reconocer las zonas activas de los objetos, su cinemática y el tipo de materia trabajada.

Tanto en el nivel TD10 de Gran Dolina como en GII de Galería (nivel TN2) se han documentado actividades de descuartizamiento, tratamiento de la piel y trabajo de materias vegetales. El grado diferencial de utilización de los instrumentos, así como las proporciones de piezas sobre cada trabajo, son los elementos que nos permiten valorar la intensidad y carácter de las diferentes ocupaciones. Así, los instrumentos de TD10 presentan alteraciones resultado de un uso intenso, con secuencias de reavivado de los filos y un alto peso específico de las actividades relacionadas con la madera y la piel (fig. 13). Por el contrario, en TN2, pese a registrar el mismo tipo de actividades, predomina un uso puntual de los objetos, relacionado mayoritariamente con el descuartizamiento de los animales. Finalmente, desde un punto de vista diacrónico y dentro de la dinámica tripolar, estos estudios pretenden evaluar la relación dialéctica existente entre forma y función, que explica buena parte de la evolución tecnológica.

La Sierra de Atapuerca constituye un punto de referencia fundamental para el estudio de los homínidos y de sus actividades durante el Pleistoceno inferior final y el Pleistoceno medio. En Europa, muy pocas localidades han suministrado información de tanto alcance para el conocimiento de la paleobiología y la paleoecología. Por lo que se refiere a los procesos de desarrollo tecnológico de estas comunidades, en el continente europeo solamente disponemos de dos yacimientos en donde se hayan podido identificar los tres modos tecnológicos: Karlïch (Alemania) y Korolevo (Ukrania). Ambos con amplias secuencias estratigráficas que abarcan un periodo comprendido entre finales del Pleistoceno inferior y el Pleistoceno medio.

**Atapuerca, único enclave de Europa donde es posible llevar a cabo el estudio de la evolución tecnológica durante el último millón de años**

En Kärlich, el estudio de una secuencia al aire libre en las riberas de un lago ha permitido diferenciar una serie de niveles, que comprenden todos los modos tecnológicos, pero en ningún caso han aparecido asociados a restos humanos. En Korolevo, también en una secuencia fluvial, se han hallado materiales que pueden ser atribuidos a los tres modos, sin embargo tampoco se encuentran asociados a registros importantes de fauna ni a restos de homínidos. Otros yacimientos han proporcionado registros líticos de gran envergadura encuadrados en el Pleistoceno medio, pero la falta de continuidad de sus series estratigráficas impide establecer secuencias de cambio fiables.

Hasta el momento, los yacimientos de la Sierra de Atapuerca son el único enclave de Europa donde es posible llevar a cabo el estudio de la evolución tecnológica durante el último millón de años, en registros bien contextualizados y asociados a conjuntos paleontológicos que incluyen series únicas de fósiles humanos. Este excepcional registro ofrece las condiciones idóneas para el conocimiento de la evolución del medio y de los modelos sociales y estrategias adaptativas adoptadas por los grupos humanos a lo largo del Pleistoceno.*

**E.C. *et al.*** ■

***Para más información***

■ Sobre los restos humanos recuperados en los yacimentos de la Sierra de Atapuerca: J.L. Arsuaga *et al. Nature*, *362*, 534, 1993. J.L. Arsuaga, *Mundo Científico*, *143*, 167, 1993.

# LAS COSMOLOGÍAS DE LOS INDIOS DE LA AMAZONIA

Philippe Descola

Igual que para sus hermanos del norte, la naturaleza es una construcción social

**PHILIPPE DESCOLA** es investigador en el laboratorio de antropología social de la Ecole des hautes études en sciencies sociales.

**El dualismo que en nuestras sociedades opone naturaleza y cultura es desconocido entre los indios de la Amazonia. También lo es entre los indios del Canadá subártico, que viven en un ambiente absolutamente distinto. Unos y otros confieren a los animales unos atributos idénticos a los de los seres humanos (intencionalidad, etc.). Tanto en el sur como en el norte, lo que nosotros denominamos naturaleza forma parte de un vasto conjunto de interacciones sociales en las que el hombre no es más que un actor entre otros muchos. Habrá que crear una antropología no dualista.**

La cumbre de Río sobre el medio ambiente ha contribuido a reforzar la idea, que ya existía, de un vínculo difuso entre las preocupaciones ecológicas contemporáneas y los interrogantes respecto al destino de la Amazonia. Para la opinión pública occidental, lo mismo que para los medios de comunicación, la selva amazónica y sus habitantes han cambiado radicalmente de imagen. El infierno verde de los años 1960 ha pasado a ser el pulmón de nuestro planeta y su principal reserva de biodiversidad. En cuanto a las tribus misteriosas e inquietantes a las que, hasta hace poco tiempo, se responsabilizaba de la desaparición de un Fawcett o de un Maufrais,* se han convertido en sociedades de sagaces botánicos y de farmacólogos. Avatar más reciente de la figura filosófica del buen salvaje, la Amazonia encarna actualmente, más que ninguna otra región de la Tierra, esta punzante nostalgia que experimenta el mundo industrializado por un modo de vida en el que el equilibrio entre el hombre y la naturaleza debería haberse conservado en perfecta armonía.

Como en cualquier estereotipo, esta visión de la Amazonia no carece totalmente de fundamento. Es cierto que, actualmente, la idea de que esta región sería la última y la más vasta selva tropical virgen existente sobre la faz de la Tierra ha sido, en gran medida, batida en brecha por los trabajos de ecología histórica.[1] La abundancia de los suelos antropogénicos* y su asociación con bosques de palmeras y de frutales silvestres sugieren que, en esta región, la distribución de los tipos de selva y de vegetación es, en parte, la resultante de varios milenios de ocupación por poblaciones cuya presencia recurrente en los mismos lugares ha modificado el paisaje vegetal. Estas concentraciones artificiales de ciertos recursos vegetales habrían influido en la distribución y la demografía de las especies animales que se alimentan de ellos, a pesar de que la naturaleza amazónica es realmente muy poco natural, ya que puede considerarse como el producto cultural de una manipulación muy antigua de la fauna y de la flora. Aunque invisibles para un observador no advertido, las consecuencias de esta antropización están lejos de ser despreciables, especialmente en lo que se refiere al índice de biodiversidad, más alto en los sectores de selva antropogénicos que en los de selva no modificada por el hombre.[2]

Hecha esta reserva, hay que decir que es cierto que las poblaciones indígenas de la Amazonia y de las Guyanas han sabido aplicar unas estrategias de uso de los recursos que, aun transformando de modo duradero el entorno, no alteraban, en cambio, sus principios de funciona-



**PERCY FAWCETT, RAYMOND MAUFRAIS,** exploradores desaparecidos en la Amazonia, respectivamente en 1925 y 1950.

**SUELOS ANTROPOGÉNICOS** Llamados en Brasil «tierra negra del indio», los suelos antropogénicos son suelos fértiles formados por detritus orgánicos acumulados a consecuencia de una larga ocupación humana de un mismo asentamiento.

(1) D. Lavallée, *Mundo Científico*, nº 173, 920, noviembre, 1996.

(2) W. Balée, *L'homme*, 126, 231, 1993.

miento ni sus condiciones de reproducción. Los estudios ecológicos y etnoecológicos efectuados desde hace unos treinta años han mostrado la fragilidad de los diversos ecosistemas amazónicos y también la diversidad y extensión del saber y de las técnicas desarrolladas por los amerindios para sacar partido del entorno y adaptarlo a sus necesidades.[3]

Se ha apuntado la idea de que, más allá de los conocimientos técnicos, botánicos, agronómicos o etológicos puestos en práctica por los indios en sus actividades de subsistencia, era el conjunto de sus creencias religiosas y de su mitología lo que debía considerarse como una especie de saber ecológico transpuesto, como si se tratara de un modelo metafórico del funcionamiento de su ecosistema y de los equilibrios que deben respetarse para que este ecosistema se mantenga en un estado de homeostasis. Contempladas desde esta perspectiva, las cosmologías amazónicas constituirían transposiciones simbólicas de las propiedades objetivas de un entorno específico. Al menos en su arquitectura interna, serían el reflejo y el producto de la adaptación —por lo demás, lograda— a un medio ecológico complejo.[4]

La idea es seductora. En efecto, a diferencia del dualismo más o menos estanco que, en nuestra visión del mundo, rige la distribución de los seres, humanos y no humanos, en dos campos radicalmente distintos, las cosmologías amazónicas despliegan una escala de seres en la que las diferencias entre hombres, plantas y animales son de grado y no de naturaleza. Los achuar de la Amazonia ecuatorial, por ejemplo, dicen que la mayor parte de plantas y de animales poseen un alma (*wakan*) similar a la del ser humano, facultad que los alinea entre las «personas» (*aents*) en tanto que les confiere conciencia reflexiva e intencionalidad, les capacita para experimentar emociones y les permite intercambiar mensajes con sus iguales, así como con los miembros de otras especies, entre ellas los hombres.[5] Se reconoce al *wakan* la capacidad de vehicular sin meditación sonora pensamientos y deseos hacia el alma de un destinatario, modificando con ello, y a veces hasta ignorándolo este último, su estado de ánimo y su comportamiento. Para ello, el ser humano dispone de una amplia gama de encantamientos mágicos, los *anent*, gracias a los cuales puede actuar a distancia no sólo sobre sus congéneres, sino también sobre las plantas, los animales, los espíritus y ciertos artefactos.

Para los achuar, los conocimientos técnicos son indisociables de la capacidad para crear un medio intersubjetivo en el que se amplían unas relaciones reguladas de persona a persona: entre el cazador, los animales y el espíritu señor de la caza, así como entre las mujeres, las plantas de su huerto y el personaje mítico que engendra las especies cultivadas y continúa, hasta aquel momento, asegurándoles su vitalidad. Lejos de reducirse a un lugar prosaico proveedor de alimentos, la selva y los desbroces para cultivo son escenarios de una sociabilidad sutil en los que, día tras día, van «ablandándose» unos seres que únicamente la diversidad de su aspecto y la falta de lenguaje hacen distintos de los humanos. Pero las formas de esta sociabilidad difieren según se trate de plantas o de animales.

Dueñas de los huertos a los que dedican gran parte de su tiempo, las mujeres se dirigen a las plantas cultivadas como si lo hicieran a niños a los que conviene llevar con mano firme hacia la madurez. Esta relación maternal toma como modelo explícito la tutela que ejerce Nunkui, espíritu de los huertos, sobre las plantas que una vez creó. Los hombres, en cambio, consideran la caza como una especie de cuñado, una relación inestable y difícil que exige respeto mutuo y circunspección. En efecto, los parientes por uniones constituyen la base de las alianzas políticas, pero son también los adversarios más inmediatos en las —muy frecuentes— guerras de *vendetta*. Así, pues, la oposición entre consanguíneos y aliados, las dos categorías recíprocamente exclusivas que rigen la clasificación social de los achuar y orientan sus relaciones con terceros, se encuentra en los comportamientos prescritos hacia los no humanos. Parientes consanguíneos para las mujeres, parientes por alianza para los hombres, los seres de la naturaleza se convierten totalmente en compañeros sociales.

(3) W. Balée, *Footprints of the forest: Ka'apor Ethnobotany*, Nueva York, Columbia University Press, 1994; M.C. van der Hammen, *El manejo del mundo. Naturaleza y sociedad entre los Yukuna de la Amazonia colombiana*, Bogotá, TROPENBOS, 1992.

(4) G. Reichel-Dolmatoff, *Man*, *11*, 307, 1976.

(5) Ph. Descola, *La Nature domestique. Symbolisme et praxis dans l'écologie des Achuar*, Editions de la maison des Sciences de l'homme, 1986.

***Desde hace unos diez años, se sabe que*** *la selva tropical ha sido transformada por los humanos desde hace mucho tiempo. Pero los indios —como estos waorani de Ecuador— no perturban el entorno. ¿Se transpone su saber ecológico a su representación del mundo, o bien éste es independiente de las limitaciones del entorno? (Fotos Ancellet/Rapho.)*



## Pero, ¿puede hablarse aquí de seres de la naturaleza si no es por comodidad del lenguaje?

¿Queda algún lugar para la naturaleza en una cosmología que confiere a los animales y a las plantas la mayor parte de los atributos de la humanidad? Por otra parte, ¿puede mencionarse como espacio selvático esta selva apenas rozada por los achuar, a la que, sin embargo, éstos describen como un inmenso jardín cultivado cuidadosamente por un espíritu? Lo que nosotros llamamos natura-

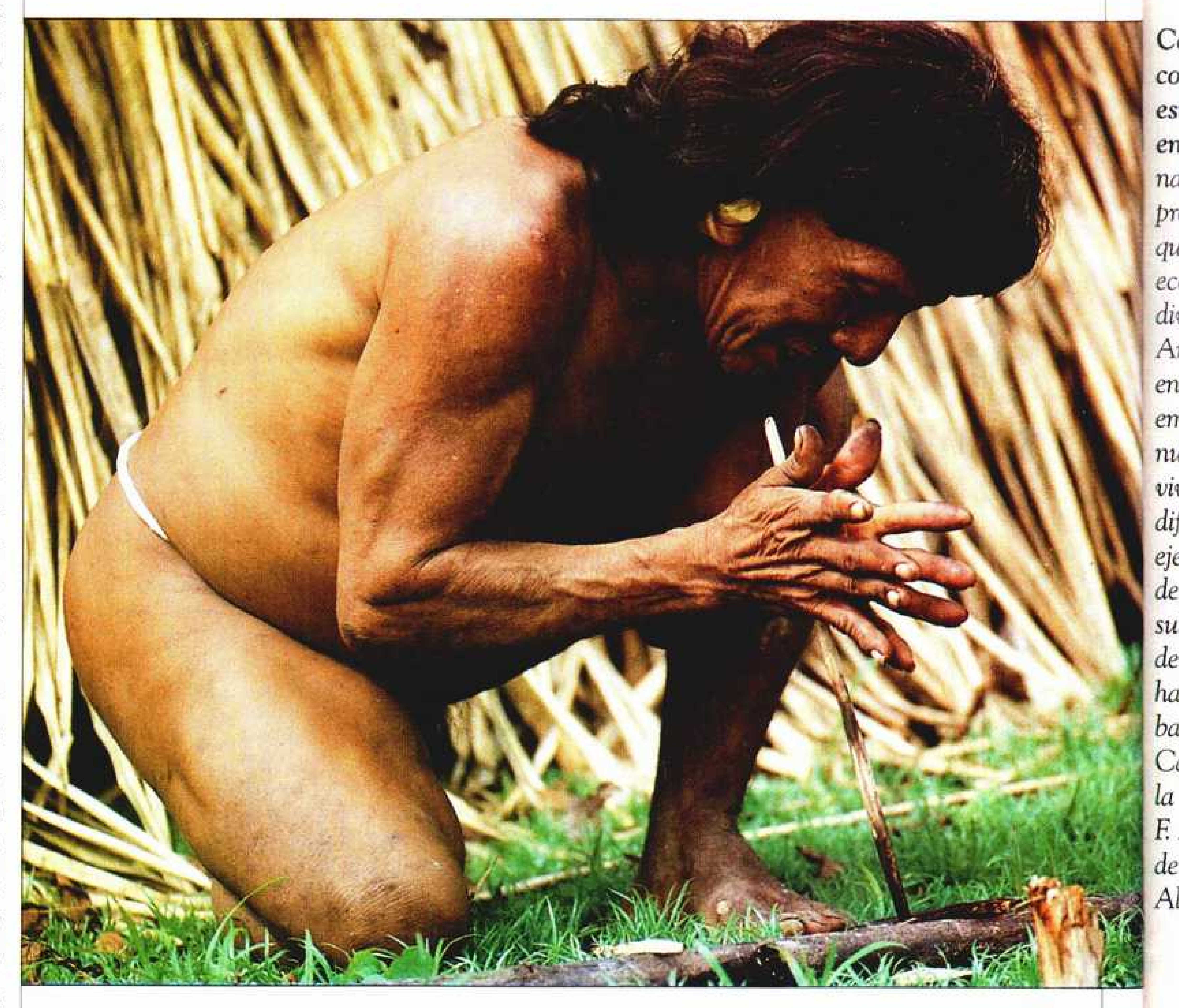
leza es aquí objeto de una relación social. Al convertirlo en una prolongación del mundo familiar, se convierte en algo verdaderamente doméstico hasta en sus reductos más inaccesibles.

¿Significa esto que los achuar no reconocerían ninguna entidad natural en el medio que ocupan? No completamente. El gran *continuum* social en el que se mezclan humanos y no humanos no incluye todos los elementos del entorno, algunos de los cuales, carentes de alma propia, no se comunican con nadie. Así, la mayor parte de los insectos y de los peces, las hierbas, los musgos y los helechos, los guijarros y los ríos permanecen en el exterior de la esfera social y del juego de la intersubjetividad. En su existencia maquinal y genérica corresponderían, quizás, a lo que nosotros llamamos «naturaleza». Por consiguiente, ¿es legítimo continuar empleando este concepto para designar un segmento del mundo que, para los achuar, es incomparablemente más restringido que el nuestro? Por otra parte, en el pensamiento moderno, la naturaleza solamente tiene sentido por oposición a las obras humanas, tanto si a éstas las queremos llamar cultura como si las consideramos sociedad, historia o espacio antropizado. Una cosmología en la que la mayor parte de los animales y plantas están incluidos en una comunidad de personas con las que comparten, total o parcialmente, facultades, comportamientos y códigos morales ordinariamente atribuidos a los hombres no responde en modo alguno a los criterios de tal oposición.

Los achuar no son un caso excepcional en el mundo amazónico. Algunos centenares de kilómetros más al norte, por ejemplo, en la selva de la Colombia oriental, los indios makuna presentan una versión todavía más radical de una teoría del mundo decididamente no dualizada.[6] Al igual que los achuar, los makuna categorizan a humanos, plantas y animales como «gentes» (*masa*) cuyos principales atributos —la mortalidad, la vida social y ceremonial, la intencionalidad, el conocimiento— son absolutamente idénticos. En esta comunidad de seres vivos, las distinciones internas se basan en los caracteres particulares que el origen mítico, los regímenes alimentarios y los modos de reproducción confieren a cada clase de ser, y no en la mayor o menor proximidad de tales clases al paradigma de realización que ofrecerían los makuna. La interacción entre los animales y los seres humanos se concibe también en forma de una relación de alianza, aunque ligeramente diferente del modelo achuar, puesto que el cazador trata su caza como un conjunto potencial y no como un cuñado. Las categorizaciones ontológicas son todavía más plásticas que en los achuar, debido a la facultad de metamorfosis que se reconoce a todos: los humanos pueden convertirse en animales, los animales en humanos, y el animal de una especie transformarse en animal de otra especie. Por tanto, la influencia taxonómica sobre lo real es siempre relativa y contextual, y el trueque permanente de las apariencias no permite atribuir identidades estables a los componentes vivos del entorno.

(6) Kaj Arhem, en Ph. Descola & G. Palsson (eds.), *Nature and Society: anthropological perspectives*, Londres, Routledge, 1996.

**Los indios de la Amazonia no establecen ninguna distinción radical entre humanos, animales y plantas**



En regiones forestales de las tierras bajas de América del Sur se han descrito muchas cosmologías análogas. A pesar de sus diferencias, todas estas cosmologías tienen una característica común: no establecen ninguna distinción esencial y tajante entre los humanos, por una parte, y un gran número de especies animales y vegetales, por otra. La mayor parte de las entidades que pueblan el mundo están unidas unas a otras en un vasto *continuum* animado por principios unitarios y gobernado por un régimen idéntico de sociabilidad. Por otra parte, las características atribuidas a estas entidades dependen menos de una definición previa de su esencia que de las posiciones relativas que ocupan unas respecto a otras en función de las exigencias de su metabolismo y, especialmente, de su régimen alimentario. Lo que distingue una especie de otra es aquello de lo que se nutre y las especies que se la comen, la comunidad cada vez diferente de aquellos con los que entabla competencia en la cadena trófica; en suma, una sociología de la predación mutua más que un catálogo de rasgos intrínsecos. La identidad de los humanos, vivos y muertos, de las plantas, de los animales y de los espíritus es completamente relacional y, por tanto, está sujeta a mutaciones o a metamorfosis según los puntos de vista que se adopten, ya que se considera que cada especie puede percibir a las otras especies según unos criterios y necesidades propias. Este hiperrelativismo perceptivo da a las cosmologías amazónicas un carácter decididamente no antropocéntrico, en tanto que el punto de vista de la humanidad sobre el mundo no es el de una especie dominante que subordina a todas las demás a su propia reproducción, sino que es más bien el que podría tener un tipo de ecosistema trascendental que sería consciente de la totalidad de las interacciones que se desarrollan en su seno.

Volvemos, pues, a la pregunta inicial: esta concepción sistemática de la biosfera que parecen tener tantos pueblos de la Amazonia ¿sería una consecuencia de las propiedades de su entorno? En efecto, los ecólogos definen la selva tropical como un ecosistema «generalizado» que se caracteriza por una enorme diversidad de las especies animales y vegetales, combi-

nada con un escaso efectivo y una gran dispersión de los individuos de cada especie. Inmersos en una monstruosa pluralidad de formas de vida que raramente se encuentran reunidas en conjuntos homogéneos, los indios amazónicos quizás habrían sido incapaces de abarcar como un todo este conglomerado dispar que solicita permanentemente sus facultades sensibles. Para resumir: al ceder por necesidad al espejismo de lo diverso, no habrían sabido disociarse de su entorno, incapaces de discernir, detrás de la multiplicidad de las manifestaciones singulares de la naturaleza, su profunda unidad.

Es a una interpretación así a la que podría invitarnos la observación hecha por Claude Lévi-Strauss[7] cuando sugiere que la selva tropical es, quizás, el único entorno que brinda apoyo al concepto de «monoindividualidad», es decir, a la atribución de características idiosincrásicas a cada individuo de una especie. En un medio tan diversificado, es posible que fuera inevitable que las relaciones entre individuos, aparentemente todos distintos, primaran sobre la construcción de macrocategorías estables y exclusivas entre sí.

La existencia de cosmologías muy parecidas elaboradas por pueblos que viven en un medio completamente distinto constituye el principal argumento en favor de esta interpretación. Es el caso, por ejemplo, de los indios de la región subártica del Canadá, que, contrariamente a los indios de la selva tropical sudamericana, explotan un entorno considerablemente uniforme. Las características del bosque boreal son exactamente inversas a las de la selva amazónica: en el ecosistema «especializado» del primero coexisten unas pocas especies, cada una de las cuales está representada por un gran número de individuos. Y, sin embargo, a pesar de la homogeneidad de su medio ecológico, los pueblos subárticos no lo consideran como un campo de realidad autónoma opuesto a las certezas de la vida social.

Es, especialmente, en su concepto del mundo animal donde los indios del bosque boreal muestran la mayor convergencia.[8] Lo mismo que en la Amazonia, la mayor parte de los animales se conciben como personas dotadas de un alma, lo que les confiere unos atributos absolutamente idénticos a los del ser humano (por ejemplo, la conciencia reflexiva, la intencionalidad, la vida afectiva o el respeto hacia unos preceptos éticos). En este aspecto, los grupos que forman los cree son especialmente representativos. Según ellos, la sociabilidad de los animales es parecida a la de los hombres, y bebe de las mismas fuentes: solidaridad, amistad y deferencia hacia los ancestros. Éstos son los espíritus invisibles que presiden las migraciones de la caza, gobiernan su dispersión y se encargan de su regeneración. Por consiguiente, si los animales difieren de los hombres es únicamente por su aspecto, una simple ilusión de los sentidos, ya que las envolturas corporales distintivas que generalmente muestran no son más que disfraces destinados a engañar a los indios. Cuando visitan a éstos en sueños, los animales se revelan tal como son en realidad, es decir, bajo su forma humana. Hablan también en las lenguas indígenas cuando su espíritu se expresa públicamente durante un ritual llamado de la «tienda temblorosa».

Sería erróneo ver en esta humanización de los animales un simple juego mental, una especie de lenguaje metafórico cuya utilidad no iría mucho más allá



*Como la cosmología no establece fronteras entre lo humano y la naturaleza, no es propia de los pueblos que viven en el ecosistema, muy diversificado, de la Amazonia. Se encuentra, sin embargo, en numerosas etnias que viven en entornos diferentes, como, por ejemplo en los cree de las regiones subárticas (a la derecha, un cree que habita cerca de la bahía James, en Canadá). (Foto de la izquierda: F. Ancellet/Rapho; de la derecha: Alexander/Cosmos.)*

del cumplimiento de unos ritos o de la narración de unos mitos. Incluso cuando hablan en términos muy prosaicos de la batida, de la muerte y del consumo de la caza, los indios expresan sin ninguna ambigüedad la idea de que la caza es una interacción social con entidades perfectamente conscientes de las convenciones que la rigen. Aquí, lo mismo que en la mayor parte de las sociedades de cazadores, es la manifestación del respeto a los animales lo que garantiza su connivencia. Por tanto, hay que evitar las masacres: matar, pero limpiamente y sin sufrimientos inútiles; tratar con dignidad huesos y despojos; no ceder a las fanfarronadas ni tampoco mencionar con demasiada claridad la suerte reservada a las presas.

Aparte de estas señales de consideración, sin embargo, las relaciones con los animales pueden expresarse en unos registros más específicos. La seducción, por ejemplo, que configura la caza a imagen de una amante; o la coerción mágica, que anula la voluntad de una presa y la obliga a aproximarse al cazador. Pero la más corriente de estas relaciones, la que mejor destaca la igualdad entre hombres y animales, es el vínculo de amistad que el cazador estrecha a lo largo del tiempo con un miembro singular de una especie. El amigo de los bosques se concibe a la manera de un animal de compañía y servirá de intermediario cerca de sus congéneres para que éstos se pongan sin disgusto al alcance del disparo del cazador. Una pequeña traición, sin duda, pero que no entraña consecuencias para los suyos, ya que la víctima del cazador se reencarnará poco después en un animal de la misma especie, siempre que sus despojos hayan recibido el tratamiento ritual prescrito.

**Estos conceptos no significan oposición entre naturaleza y sociedad, sino que razonan según un principio de circulación de los flujos**

Así pues, al igual que los pueblos de la Amazonia, los de la región subártica conciben su entorno a la manera de una densa red de interrelaciones regida por principios que no discriminan a humanos y no humanos. Evidentemente, a causa de los caracteres objetivos de su ecosistema, y especialmente de las pocas especies vivas, esta red de interrelaciones no es tan rica ni compleja como la de los pueblos de la selva tropical; pero las estructuras de una y otra red son totalmente análogas, lo que excluye que la segunda sea el producto de una adaptación a un entorno más diversificado. Lejos de ser específicas, las cosmologías amazónicas vienen a unirse a una familia más vasta de conceptos del mundo que no establecen ninguna distinción tajante entre naturaleza y sociedad, y que hacen prevalecer como principio organizador la circulación de los flujos, de las identidades y de las sustancias entre entidades cuyas características dependen menos de una esencia abstracta que de las posiciones relativas que ocupan unas respecto a otras.

Cuando se intenta calificar estos sistemas, es inevitable recordar una palabra. Una palabra sobre la que la antropología contemporánea ha corrido un velo púdico quizá porque recuerda con demasiada crudeza los antiguos debates de esta disciplina sobre la cuestión del

(7) C. Lévi-Straus, *La Pensée sauvage*, Plon, 1962, p. 284.
(8) R. Brightman, *Grateful Prey: Rock Cree Human-Animal Relationship*, Berkeley, University of California Press, 1993; E. Désveaux, *Anthropos*, 90, 435, 1995; F.L. Speck, *Naskapi. The Savage Hunters of the Labrador Peninsula*, Norman University of Oklahoma Press, 1935; A Tanner, *Bringing Home Animals. Religious Ideology and Mode of Production of the Mitassini Cree Hunters*, St. John, Memorial University of Newfoundlands, 1979.

origen de las religiones y las supuestas diferencias entre el pensamiento primitivo y el pensamiento científico. Esta palabra es *animismo*. Entre otras cosas, el animismo es la creencia de que los seres «naturales» están dotados de un principio espiritual propio y que, por tanto, es posible que los hombres establezcan con estas entidades unas relaciones especiales: relaciones de protección, de seducción, de hostilidad, de alianza o de intercambio de servicios.

Sobre el animismo así entendido, la antropología contemporánea ha mostrado una enorme discreción, sin duda a causa del gran cambio de perspectiva introducido por Claude Lévi-Strauss en el análisis del totemismo.[9] Rehuyendo explicaciones psicologizantes, evolucionistas o utilitaristas que intentaban dilucidar el nexo místico y participativo que, según se creía, existía entre un grupo de filiación y la planta o el animal que le servía de epónimo, Lévi-Strauss demostró que el llamado totemismo no era más que una lógica clasificatoria que utilizaba las discontinuidades empíricamente observables entre las especies, con el fin de organizar un orden delimitador de las unidades sociales.

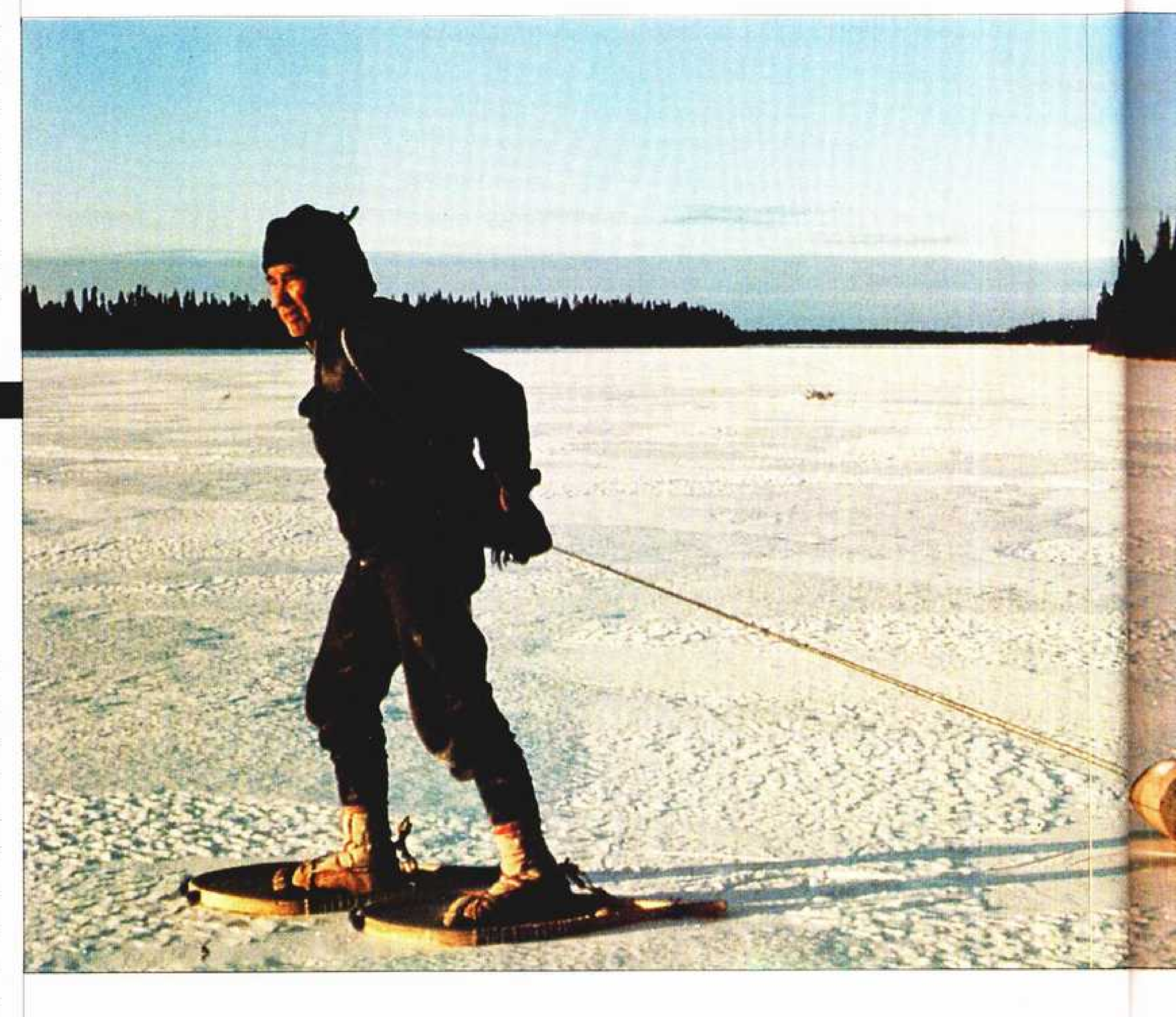
## ¿Son el animismo y el totemismo representaciones legítimas del mundo?

Plantas y animales ofrecen un punto de apoyo al pensamiento clasificatorio y, a causa de las cualidades sensibles contrastadas que su discontinuidad morfológica y etológica exhibe espontáneamente, se convierten en signos aptos para expresar metafóricamente las diferencias necesarias para la perpetuación de la organización clánica. Esta interpretación recobra la explicación sociocéntrica que habían propuesto Durkheim y Mauss en su famoso ensayo sobre las clasificaciones primitivas: no es la organización clánica la que proporciona el modelo de la clasificación de los seres de cada medio, sino que, por el contrario, serán las diferencias perceptibles entre éstos las que servirán para conocer las diferencias entre los clanes.[10]

Al resolver de una manera magistral la cuestión del totemismo, la demostración de Lévi-Strauss contribuyó a que se olvidara que la objetivación de los no humanos por los humanos podía concebirse de otro modo que no fuera mediante un dispositivo clasificatorio. Ahora bien, el animismo es también una forma de objetivación social de las entidades que nosotros denominamos naturales, en tanto que confiere a tales entidades no solamente unas disposiciones antropocéntricas —es decir, la condición de persona, a menudo dotada de palabra y poseedora de los afectos humanos— sino también unos atributos sociales, la jerarquía de las posiciones, de los comportamientos basados en el parentesco, el respeto hacia ciertas normas de conducta y la obediencia a códigos éticos. Estos atributos sociales proceden del repertorio de cada cultura, que caracterizará sus relaciones con los diversos segmentos del entorno en función de los modos de sociabilidad localmente dominantes: los diferentes grados de parentesco consanguíneo, el parentesco por alianza, la autoridad del jefe sobre un grupo local o del hermano mayor sobre los menores, la amistad ritual, la hostilidad codificada, etc.

En este sentido, el animismo puede ser visto no como un sistema de categorización de las plantas y de los animales, sino como un sistema de categorización de los tipos de relaciones que los humanos mantienen con los no humanos. Los sistemas anímicos tienen, pues, una simetría inversa a las clasificaciones totémicas entendidas en el sentido de Lévi-Strauss, en tanto que no utilizan las relaciones diferenciales entre los no humanos para ordenar conceptualmente la sociedad, sino que, por el contrario, se sirven de las categorías elementales que estructuran la vida social para ordenar conceptualmente la relación de los hombres con las especies vivas y, por derivación, las relaciones entre estas especies. En resumen, en los sistemas totémicos, los no humanos son tratados como signos, y en los sistemas anímicos, como el término de una relación.

Así entendidos, animismo y totemismo constituyen lo que a mí me gustaría llamar modos de identificación, es decir, maneras de definir las fronteras propias y ajenas. Considerarlos como manifestaciones legítimas del intento de dar un sentido al mundo suscitará, sin duda, dificultades de toda clase, especialmente a causa de unos presupuestos que derivan de nuestro propio modo de identificación, es decir, del naturalismo. El naturalismo es, simplemente, la creencia de que la naturaleza existe. Dicho de otro modo: ciertas entidades deben su existencia y su desarrollo a un principio extraño a los efectos de la voluntad humana. Típico de las cosmologías occidentales desde Platón y Aristóteles, el naturalismo produce un campo ontológico específico, un lugar de orden y de necesidad en el que nada ocurre sin una causa, tanto si esta causa se refiere a una instancia trascendente como si es inmanente a la textura del mundo. En la medida en que el naturalismo es el principio rector de nuestra propia cosmología y que impregna tanto nuestro sentido común como nuestra práctica científica, se ha convertido para nosotros en un presupuesto en cierto modo «natural», que estructura nuestra epis-



(9) C. Lévi-Strauss, *Le Totémisme aujourd'hui*, PUF, 1962.
(10) E. Durkheim y M. Mauss, *Année sociologique*, 6, 1, 1903.

temología y, especialmente, nuestra percepción de los otros modos de identificación. Por consiguiente, considerados desde un punto de vista naturalista, el totemismo y el animismo se nos aparecen como representaciones intelectualmente interesantes, pero fundamentalmente falsas, como si fueran simples manipulaciones simbólicas de este campo específico de fenómenos que llamamos «naturaleza». Sin embargo, si se intenta hacer abstracción de este presupuesto, constatamos que la existencia de la naturaleza como un campo autónomo ya no es un dato bruto de la experiencia, como tampoco lo son los animales que hablan o los vínculos de filiación entre los hombres y los guacamayos. Y todavía más: no existe ninguna justificación objetiva que permita afirmar que los humanos forman una comunidad de organismos totalmente distinta de los otros componentes bióticos y abióticos del entorno, tal como pensamos, y que no hay que considerar que los humanos, las plantas y los animales forman una comunidad jerarquizada de personas totalmente distinta de los minerales, tal como tienden a pensar muchas sociedades de todo el mundo. Allí donde nosotros introducimos el lenguaje articulado y la bipedia como criterios decisivos de la humanidad, otras culturas prefieren optar por categorías más globalizadoras basadas en la animación, la locomoción autónoma o la presencia de rastros particulares, como la dentición o la reproducción sexuada.

*Si no se quiere caer en el etnocentrismo —nuestra representación del mundo es la más justa—, hay que integrar otras representaciones, como la de los indios cree, que buscan un principio de orden común a todas. Un punto de partida es la constatación de que todas las conceptualizaciones del entorno se basan en un referencial antropocéntrico. (Foto Alexander/Cosmos.)*

(11) G. Bateson, *Vers une écologie de l'esprit*, Le Seuil, 1977 y 1980.

No obstante, la idea de que la «naturaleza» es una construcción social en perpetuo devenir plantea un reto formidable a la antropología: ¿hemos de restringir nuestra ambición de describir de la manera más fiel posible los conceptos específicos que de su entorno han construido ciertas sociedades en épocas diferentes, o bien debemos buscar unos principios de orden que permitan comparar la diversidad empírica, aparentemente infinita, de los complejos de naturaleza-cultura? Por mi parte, me muestro reticente a adoptar, en esta materia, una posición relativista, ya que, entre otras razones, tal perspectiva supone lo que conviene establecer. En efecto, el relativismo tiene como corolario implícito la creencia en una naturaleza universal que poseería en todas partes las propiedades y las fronteras que nuestra propia cultura les atribuye, y sobre la cual se desplegaría una proliferación de sistemas del mundo especiales, definidos por un ensamblaje arbitrario de símbolos cuya función sería codificar este sustrato natural considerado común a todos. Desde este punto de vista, no solamente la causa misma de diferencias en las conceptualizaciones del ambiente sigue sin ser explicada, sino que también, y a pesar de todas las proclamas relativistas, resulta imposible escapar del etnocentrismo, es decir, del privilegio concedido a la única cultura cuya definición de la naturaleza sirve de patrón implícito para medir todos los otros.

Supongamos, pues, que existen estructuras muy generales que organizan la manera en que las personas construyen representaciones de su medio físico y social. ¿Dónde hay que empezar a buscar para hallar indicios de su existencia y de su *modus operandi*? El punto de partida que me ha parecido más sencillo es el siguiente: un rasgo característico de todas las conceptualizaciones del medio es que éstas se basan en un referencial antropocéntrico. Esta propiedad genera modelos en los que las categorías y las relaciones sociales sirven de plantilla mental para ordenar el cosmos, o bien modelos en los que las discontinuidades entre no humanos nos permiten pensar las discontinuidades entre humanos, o, también, modelos como el nuestro en el que la naturaleza se define negativamente como este segmento ordenado de la realidad que se desarrolla independientemente de la acción humana. En todos los casos, es decir, tanto si opera por inclusión como por exclusión, la objetivación social de los no humanos no puede disociarse de la objetivación de los humanos. Ambos procesos se basan en la configuración de las ideas y de las prácticas que, dentro de cada sociedad, define los conceptos de uno mismo y de los demás. Ambos procesos implican el trazado de unas fronteras, la imputación de unas identidades y la elaboración de mediaciones culturales. Es lo que yo he denominado modos de identificación.

## Una ecología de las relaciones no considera sociedad y naturaleza como sustancias autónomas

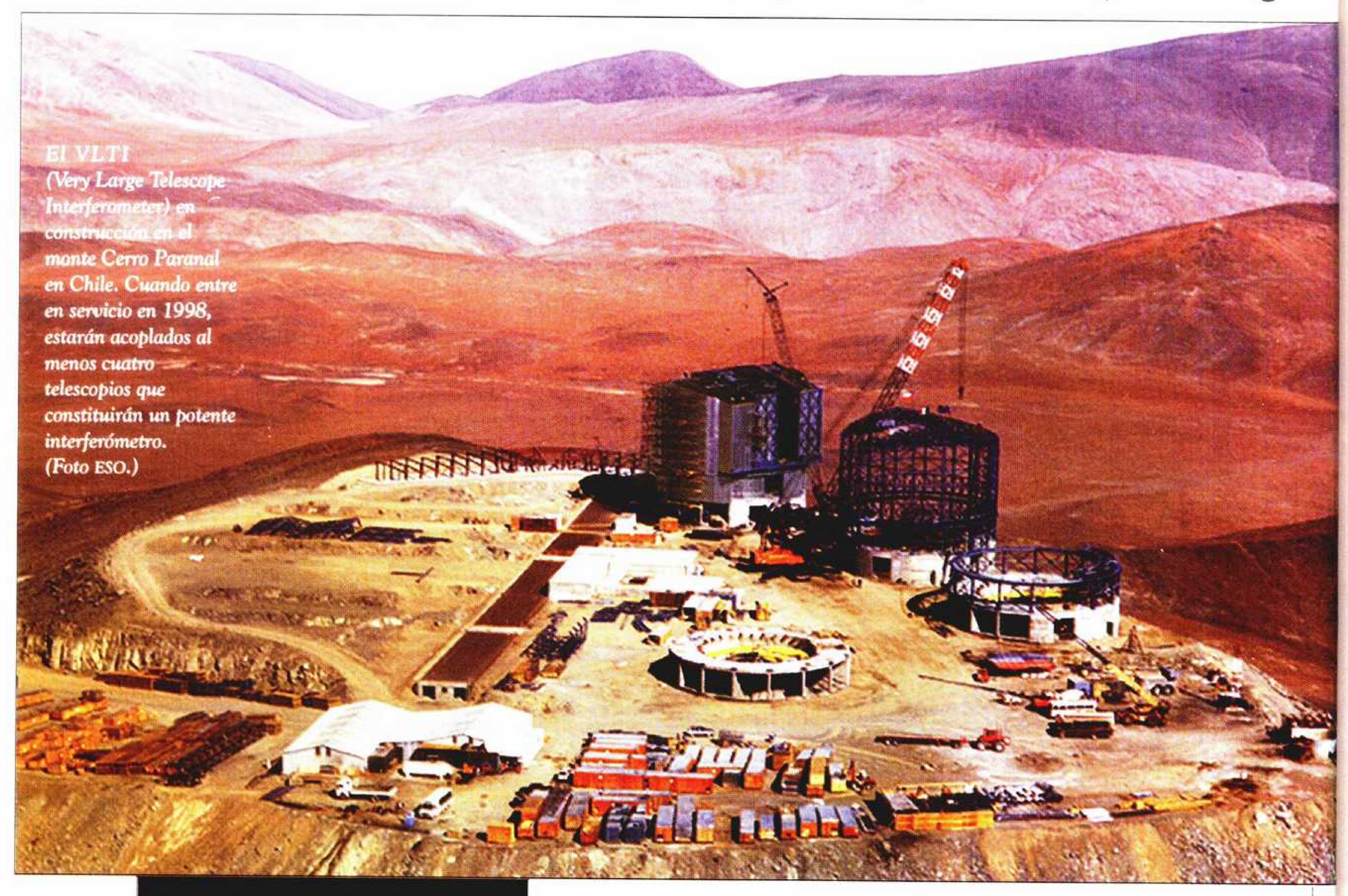
Sin embargo, si queremos acabar con el dualismo y con el debate estéril entre universalismo y relativismo que, en definitiva, no es más que una reliquia de la dicotomía naturaleza/cultura, es necesario dar un paso más. Ir más allá del dualismo, hacia una antropología plenamente monista, implica dejar de tratar a sociedad y a cultura, lo mismo que a las facultades humanas y la naturaleza física, como sustancias autónomas e instancias causales. Esto permitiría abrir la vía a una verdadera comprensión ecológica de la constitución de las entidades individuales y colectivas. Es en este sentido original de una ciencia de las relaciones, cuya fecundidad han demostrado ya Gregory Bateson[11] y Claude Lévi-Strauss, donde la ecología puede inspirar a las ciencias sociales y humanas, y no bajo las especies del determinismo geográfico simplista que se ha apropiado indebidamente de la expresión. Tanto si existen por sí mismas como si son definidas desde el exterior, tanto si son producidas por los hombres como si solamente son percibidas por ellos, tanto si son materiales como inmateriales, las entidades que constituyen nuestro universo solamente poseen un sentido y una identidad a través de las relaciones que las instituyen como tales. Ahora bien, a pesar de que estas entidades son, por derecho, casi infinitas, las relaciones que las une no lo son; únicamente difieren los contextos históricos y culturales dentro de los cuales se actualizan o no estas relaciones. Una antropología no dualista debería fijarse como campo de estudio este proceso de actualización, los elementos a los que se refiere, así como las circunstancias y los contextos que lo hacen posible.

**Ph. D.**

# INTERFEROMETRÍA ÓPTICA: LUCES Y SOMBRAS EN EL UNIVERSO

Sacha Loiseau y Guy Perrin

## Del experimento de Thomas Young a los proyectos espaciales del próximo siglo



El VLTI (Very Large Telescope Interferometer) en construcción en el monte Cerro Paranal en Chile. Cuando entre en servicio en 1998, estarán acoplados al menos cuatro telescopios que constituirán un potente interferómetro. (Foto ESO.)

SACHA LOISEAU
DESPA/
Observatorio de Meudon
loiseau@bluenote.obspm.fr
GUY PERRIN
DRET y DESPA/
Observatorio de Meudon
perrin@hplyot.obspm.fr

**Hace casi dos siglos, el ingenio de Thomas Young hizo aparecer en escena las primeras «franjas de interferencia». Los ópticos se dieron pronto cuenta de que estas figuras contienen una interesante información sobre la fuente luminosa que las ha producido. Varias generaciones de astrónomos intentaron utilizar esta técnica, pero sus esfuerzos eran prematuros. El primer interferómetro óptico con dos telescopios no apareció hasta 1974, gracias a Antoine Labeyrie. Al principio de este año se han publicado las primeras «imágenes» surgidas de un instrumento formado por tres telescopios. Y los proyectos de interferómetros ópticos se multiplican...**

Al principio del siglo XIX, el físico británico Thomas Young realizaba un experimento al que le esperaba un gran futuro. Colocando un obstáculo perforado con dos agujeritos delante de una fuente luminosa, Young obtuvo proyectada sobre una pantalla una alternancia de estrías oscuras y claras: las franjas de interferencia. El experimento de Young demostraba, por primera vez, que una luz (procedente de un agujero) superpuesta a otra luz (procedente del otro agujero) puede producir oscuridad. El descubrimiento del fenómeno de las interferencias luminosas abría nuevas perspectivas a la física. En particular, confirmaba la interpretación ondulatoria de la luz.

En 1868, los físicos franceses Fizeau y Stephan tuvieron la idea de aplicar el experimento de Young a la medición del diámetro de las estrellas. En aquella, época se sabía que variando la separación entre los agujeros se podía modificar la intensidad relativa de las franjas oscuras y claras. Pero Fizeau fue más lejos. Estableció teóricamente que, cuando se anula el contraste de las franjas de interferencia, la separación entre los dos agujeros está directamente relacionada con el tamaño de la fuente —una estrella— por medio de una ley matemática muy sencilla (fig. 1). Fizeau y Stephan construyeron un interferómetro rudimentario: a la entrada de un telescopio de un metro de diámetro colocaron una máscara en la que se había perforado dos agujeros de modo que salían dos haces. Apuntaban su instrumento en dirección a las estrellas más brillantes del cielo y obtenían franjas de interferencia por recombinación de la luz. Sin embargo no se alcanzó el objetivo científico. No sólo el contraste entre las

**LEY DE FIZEAU**
Cuando el contraste entre las franjas se anula por primera vez se cumple:
$\theta = 1{,}22\ \lambda/L$
($\lambda$ designa la longitud de onda en metros, L la distancia entre los agujeros en metros, y $\theta$ el diámetro angular de un objeto en radianes).

En un ángulo de 1 grado hay 3.600 **SEGUNDOS DE ARCO**

**LA BASE**
es la distancia que separa los dos telescopios de un interferómetro o la separación entre los dos agujeros en un interferómetro que utilice una máscara perforada a la entrada del telescopio.

El método de los **PARALAJES TRIGONOMÉTRICOS** se basa en la observación de la posición de las estrellas con seis meses de intervalo, es decir en dos posiciones diametralmente opuestas de la Tierra en su órbita. El paralaje de una estrella es el ángulo con el que se vería la distancia Tierra-Sol desde esta estrella.
**1 PARSEC**
equivale a unos 30 billones de kilómetros, es decir 206.400 veces la distancia Tierra-Sol. Es la distancia desde la que se ve la distancia Tierra-Sol con un ángulo de 1 segundo.

franjas resultaba demasiado fuerte, sino que, sobre todo, no variaba al modificar la posición relativa de los agujeros. Determinar el diámetro de los astros con este método parecía muy comprometido. La idea fue abandonada.

Veinte años más tarde, el norteamericano Michelson retomó el experimento de Fizeau y Stephan. Michelson comprendió que la razón del fracaso de los franceses residía en la elección de la distancia entre los agujeros. En realidad, Fizeau y Stephan no disponían de un telescopio suficientemente grande que les permitiese separar más los agujeros de la máscara (la ley de Fizeau* indica que la distancia entre los agujeros tiene que ser más grande a medida que disminuye el diámetro angular de las estrellas).

Para validar el método, Michelson decidió apuntar el instrumento interferométrico a objetos próximos cuyo diámetro se conocía con una precisión bastante buena. Eligió los satélites de Júpiter. Su diámetro está cerca del segundo de arco*. Michelson logró medir una fuerte disminución del contraste entre las franjas haciendo variar la distancia entre los agujeros. En 1980 reprodujo las dimensiones de los satélites, lo que validó definitivamente el fundamento de la interferometría óptica aplicada a la astronomía.

Tras este experimento concluyente, Michelson y su colega Pease iniciaron la construcción de un dispositivo más adecuado para la observación de las estrellas. La realización de su interferómetro estelar requirió varios años. Como la utilización de una máscara perforada viene limitada por el diámetro del telescopio, Michelson y Pease utilizaron dos espejos que hacían las funciones de «agujeros». Los espejos estaban sujetos a una viga. Su distancia (que se llama base* del interferómetro) podía variar hasta seis metros. En conjunto, el instrumento compuesto (espejos + telescopio) resulta equivalalente a un único telescopio de un diámetro máximo de seis metros. Los espejos se orientan de forma que dirijan los rayos luminosos procedentes de un astro al foco de un telescopio en el que la luz se recombina para producir las franjas.

La noche del 31 de diciembre de 1920, Michelson y Pease lograron por primera vez anular prácticamente el contraste de las franjas observando la estrella Betelgeuse por medio del telescopio de 2,5 metros de diámetro de Mont Wilson en California. La base del interferómetro valía entonces tres metros.[1] De ahí Michelson y Pease dedujeron el valor del diámetro angular de la estrella y obtuvieron 0,047 segundos de ángulo. Su instrumento, cuya resolución teórica (véase el recuadro «Sensibilidad y resolución») era de 0,02 segundos de ángulo, permitió revelar así la naturaleza de gigante roja de Betelgeuse, la estrella más brillante de la constelación de Orión. Como su distancia, de un centenar de parsec*, ya se conocía gracias al método de los paralajes trigonométricos*, Michelson y Pease pudieron evaluar su diámetro: la estrella es 400 veces más grande que el Sol. Un resultado sorprendente para la época. Sin embargo, Arthur Eddington había obtenido, poco tiempo antes, un valor comparable del radio de Betelgeuse a partir de consideraciones puramente teóricas sobre la estructura estelar.

Gracias a su instrumento, Michelson y Pease disminuyeron radicalmente las limitaciones impuestas por la turbulencia atmosférica que degrada la definición de las imágenes. Ya que su interferómetro proporciona una información cuya resolución es muy superior a la que se puede esperar en la práctica con un telescopio clásico, es decir algunos segundos de arco. Pero el experimento de Michelson y Pease suscitó escaso interés.

**La interferometría se estanca en las longitudes de onda visibles mientras que a partir de los años 60 adquiere un gran impulso en las ondas de radio**

De hecho, para el estudio de estrellas de tamaño más común se manifestaba indispensable construir un interferómetro de mucha mayor envergadura asociando dos telescopios. Pero el desafío era técnicamente demasiado difícil de aceptar en la época. En efecto, para construir un interferómetro óptico se tiene que poder controlar el camino que sigue la luz en el interior del sistema óptico con un error inferior a una frac-

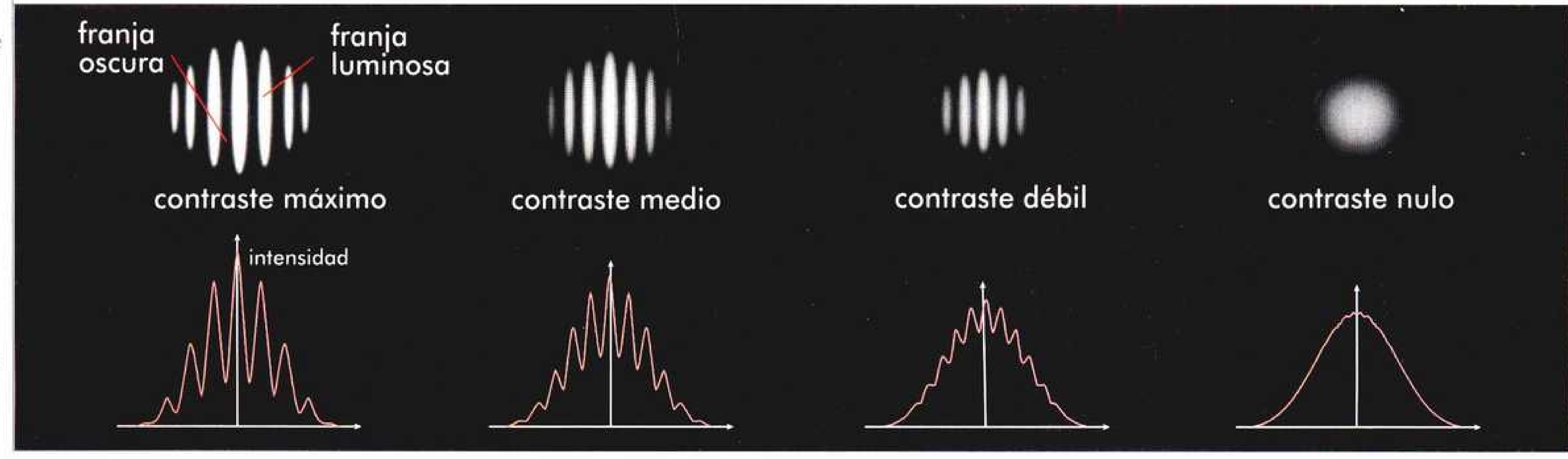



*Figura 1. Las franjas de interferencia.* A medida que se aumenta la base del instrumento interferométrico (de izquierda a derecha), disminuye el contraste entre las estrías blancas que corresponden a luz y las estrías negras que corresponden a oscuridad. Cuando se elige convenientemente la base* en función del objeto estudiado, el contraste entre las franjas se hace nulo (luz uniforme, a la derecha). En este caso se puede deducir el tamaño de la fuente por medio de una ley sencilla. Ésta es la técnica utilizada por los astrónomos para medir el diámetro de las estrellas.

## SENSIBILIDAD Y RESOLUCIÓN

La sensibilidad de un telescopio es su capacidad de captar los fotones, las partículas de la luz. Es proporcional a la superficie del espejo primario* y por lo tanto al cuadrado del diámetro de dicho espejo. El poder de resolución del telescopio es su capacidad de discernir pequeños detalles en una imagen. Es proporcional al diámetro del espejo primario. Tecnológicamente, el tamaño de un telescopio tiene un límite. En la actualidad se habla de espejos segmentados de 25 metros de diámetro, lo que probablemente es el *non plus ultra* en la materia. Con un instrumento de este tipo, del que por lo demás no existe ningún prototipo, se podrían alcanzar unas resoluciones en el intervalo de las longitudes de onda visibles del orden de 0,01 segundos de arco, lo que permitiría distinguir a un hombre a una distancia de 40.000 kilómetros (la sexta parte de la distancia Tierra-Luna). Al asociar varios telescopios, la interferometría permite desacoplar (y controlar) los dos parámetros sensibilidad y resolución y abre el acceso a la alta resolución angular. La precisión astrométrica aumenta con la separación entre los telescopios y con su sensibilidad. La resolución mejora a medida que aumenta la distancia entre los telescopios.

**ASTROFÍSICA**

El intervalo de las longitudes de onda **VISIBLES** se extiende desde unos 0,4 hasta unos 0,8 micrómetros. Es el intervalo de sensibilidad del ojo humano.

**LA ASTROMETRÍA** es una parte de la astronomía que se dedica a la medida de la posición y del movimiento de los astros.

Un telescopio está compuesto por varios espejos. El espejo **PRIMARIO** es el primero que recibe la luz de los astros.

ción de la longitud de onda, es decir algunas décimas de micrómetro. Esto impone unas condiciones draconianas al calibrado del instrumento, una perfecta estabilidad del sistema y el reglaje de la base* con una precisión de algunas decenas de micrómetros. Considerada irrealizable, la interferometría óptica desapareció de nuevo del primer plano de la escena astronómica durante una cincuentena de años. En realidad fue en el intervalo de las ondas de radio donde la interferometría llegó en primer lugar a la madurez, al final de la segunda guerra mundial.[2] Por principio, la recombinación de los haces es tanto más fácil de realizar cuanto mayor es la longitud de onda. Las longitudes de onda radio son de diez mil a un millón de veces más largas que las longitudes de onda ópticas. Además, las tecnologías de la radio se beneficiaron de un desarrollo fulgurante durante el conflicto mundial.

Al principio de los años 70, el francés Antoine Labeyrie se dio cuenta que las tecnologías estaban suficientemente maduras (aparición de los primeros láseres, buenos detectores en el campo de las longitudes de onda visibles, etc.) para construir un interferómetro óptico de larga base.

Fue el primero en obtener, en 1974, franjas de interferencia a partir de dos telescopios distintos.[3] Su instrumento, cuya base tiene 12 metros, se llama *I2T*, por Interferómetro de Dos Telescopios. La disciplina se revitalizó. Pronto se construirían varios instrumentos en todo el mundo.

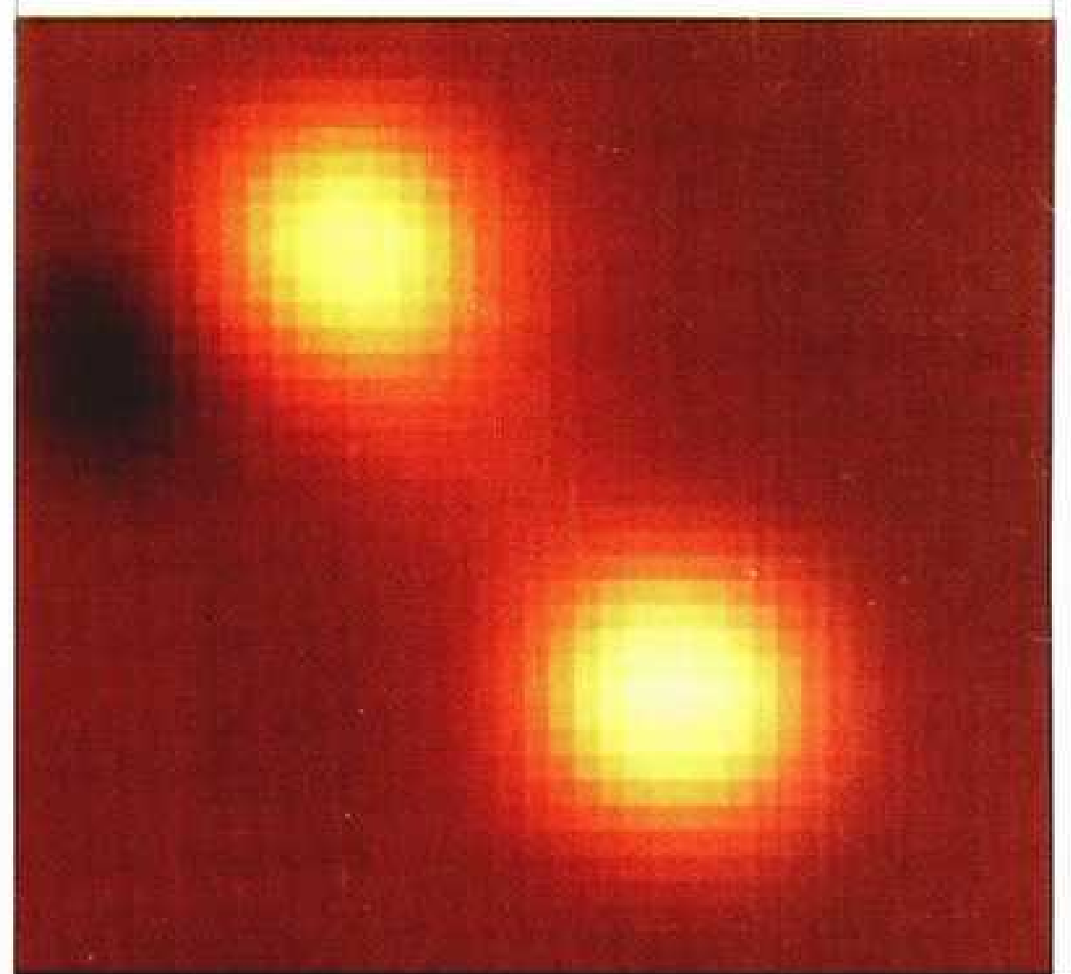
**La interferometría óptica tiene un serio competidor, la óptica adaptativa, que proporciona a los telescopios una resolución mucho mayor**

Al final de los años 80, apareció otra técnica susceptible de aumentar la resolución angular: la óptica adaptativa.[1] Esta técnica permite compensar la turbulencia atmosférica que, incluso en caso de negra noche y cielo despejado, degrada las imágenes. Consiste concretamente en deformar en tiempo real los espejos de los telescopios. De este modo se reduce fuertemente el límite de resolución y se confiere al telescopio una resolución próxima a su valor teórico. En telescopios terrestres de 3,6 metros de diámetro, la resolución pasa así de un segundo a una décima de segundo de ángulo, es decir un rendimiento comparable al del telescopio espacial *Hubble*. Los mayores espejos que se puede esperar construir no pasarán de 25 metros de diámetro: por lo tanto la resolución de los mayores telescopios provistos de una óptica adaptativa, tendría lógicamente que tener un techo hacia 0,01 segundos de ángulo en las longitudes de onda visibles. Pero la óptica adaptativa presenta un desafío importante: proporciona de forma directa y natural imágenes, es decir una información en dos dimensiones.

Y, todavía hace menos de un año, la interferometría óptica proporcionaba una información fundamentalmente monodimensional, es decir un número, un tamaño o una distancia. Pero al principio del año 1996 la revista europea *Astronomy and Astrophysics* ha publicado las primeras «imágenes» procedentes de un interferómetro óptico. ¿El progreso? Se ha pasado a una interferometría con tres telescopios. En sí mismo el fundamento no es nuevo, ya que la interferometría con tres telescopios (y más) se desarrolló en los años 60 para la observación en las longitudes de onda radio. Corrientemente utilizada desde hace más de treinta años por los radioastrónomos, alcanzaba el éxito en los intervalos infrarrojo y visible hace apenas unos meses. La imagen obtenida por el equipo británico del interferómetro COAST (*Cambridge Optical Aperture Synthesis Telescope*)[4,5] es de las dos estrellas del sistema Capella. La estrella doble se ha fotografiado durante su danza orbital con quince días de intervalo (fig. 2). Por primera vez, se ha podido cartografiar el sistema binario. Poco después, un segundo interefrómetro NPOI (*Naval Prototype Optical Interferometer*), con base en Flagstaff en Arizona, ha realizado una proeza idéntica cartografiando el sistema binario Mizar (fig. 3).

COAST y NPOI abren el camino de la imaginería de muy alta resolución angular en el intervalo de las longitudes de onda visibles. Pronto aparecerán imágenes dotadas de una resolución del orden del milisegundo de ángulo —es decir veinte veces mejores que el teslecopio

## Primeras imágenes ópticas



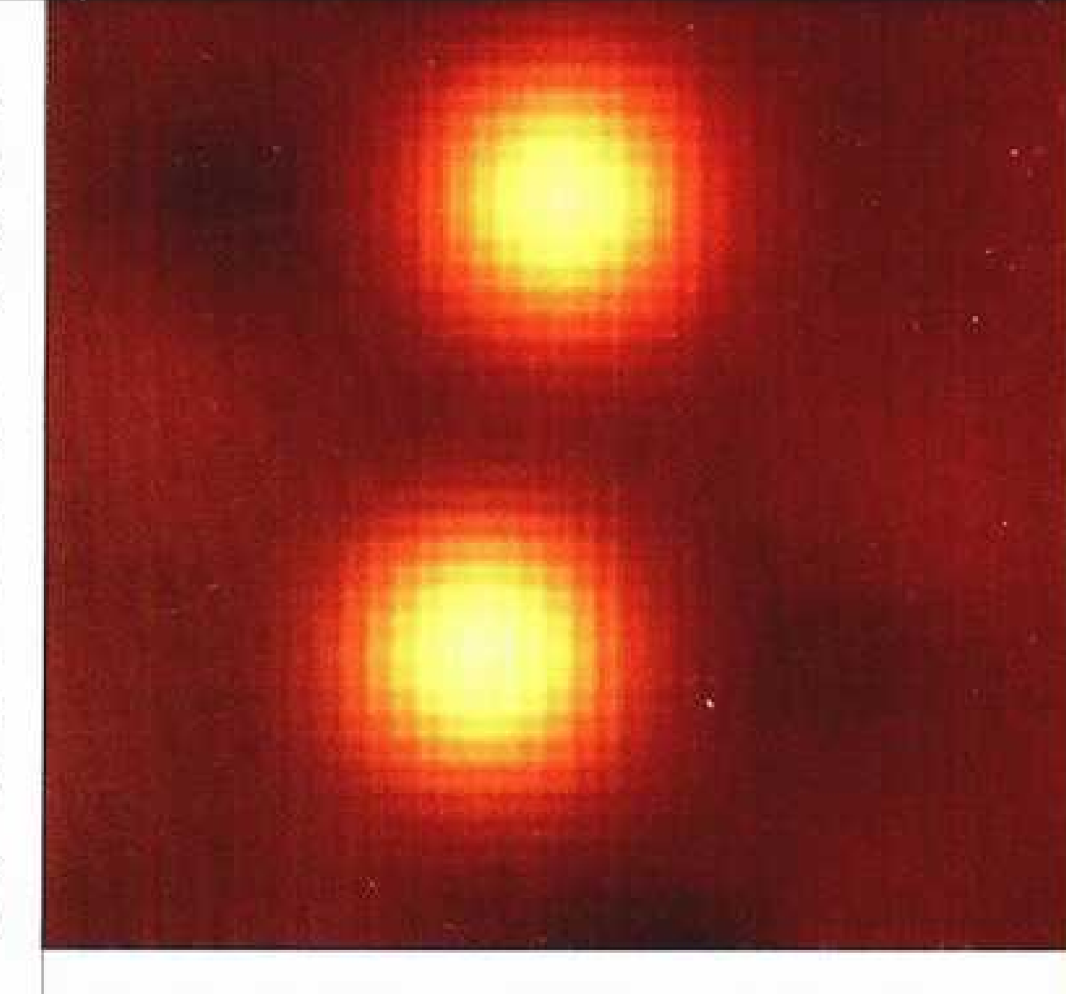
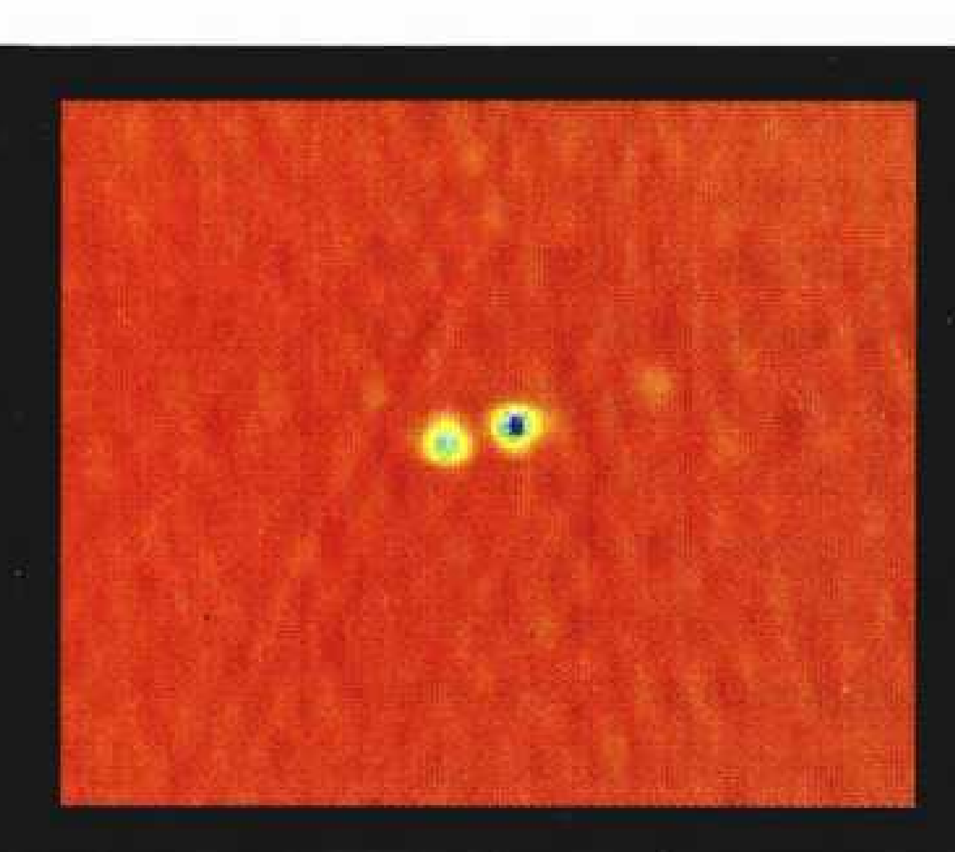
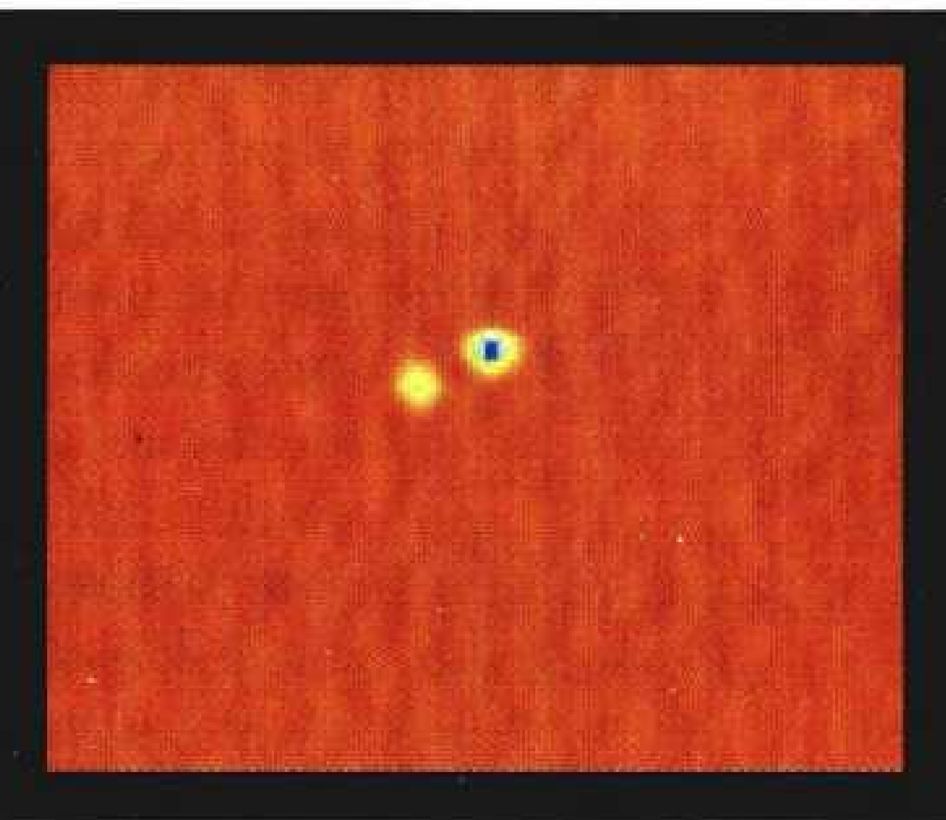


*Figura 2.* ***El sistema binario Capella*** *cartografiado por el interferómetro inglés* COAST (Cambridge Optical Aperture Synthesis Telescope). *Las dos imágenes se obtuvieron con 15 días de intervalo, el 13 de septiembre (arriba) y el 28 de septiembre (a la derecha). La distancia angular que separa a las dos estrellas de la constelación del Cochero es de 0,055 segundos de arco. (Fotos tdr.)*





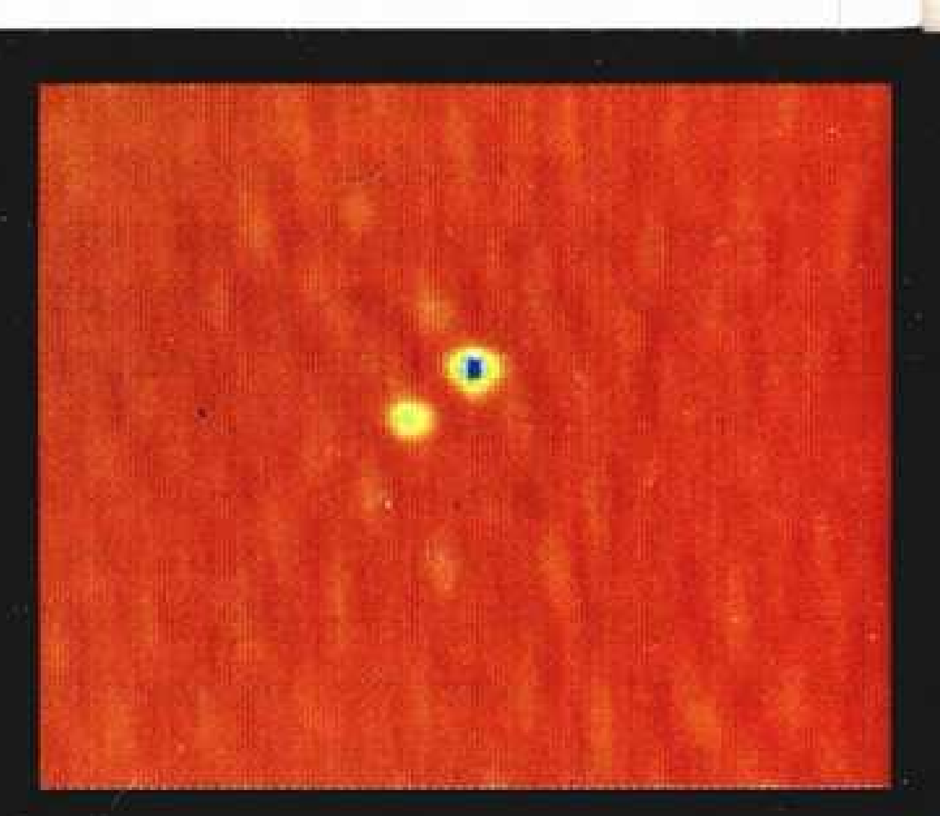


***Figura 3. Cartografía del sistema binario Mizar de la constelación de la Osa Mayor por el interferómetro norteamericano*** **NPOI (Naval Prototype Optical Interferometer).** ***Las siete imágenes se tomaron (de izquierda a derecha) los días 1, 2, 3, 4 y 29 de mayo y 1 y 4 de junio de 1995. (Fotos*** **USNO/NRL.)**

(1) A.A. Michelson y F.G. Pease, *Ap. J.*, 53, 249, 1921.
(2) «La naissance de la radioastronomie», *Les Cahiers de Science et Vie*, abril 1992.
(3) A. Labeyrie *Ap. J. Letters*, 196, L71, 1975.
(4) J.E. Baldwin et al., *Astron. and Astrophys.*, 306, 13, 1996.
(5) *Physics today*, 17, abril 1996.

| | PAÍS | N | BASE | DIÁMETRO | DESDE | MODO |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PTI | Estados Unidos | 2(3) | 100 | 0,45 | 1995 | A/I |
| IOTA | Estados Unidos | 2(3) | 38 | 0,45 | 1993 | I/A |
| I2T | Francia | 2 | 140 | 0,26 | 1974 | V/I |
| GI2T | Francia | 2 | 65 | 1,52 | 1984 | V/I |
| COAST | Gran Bretaña | 3 | 30 | 0,40 | 1991 | V |
| NPOI | Estados Unidos | 3 | 60 | 0,50 | 1991 | I |
| ISI | Estados Unidos | 2 | 35 | 1,65 | 1988 | I/A |
| SUSI | Australia | 2 | 640 | 0,14 | 1991 | V |

*Tabla 1. Interferómetros ópticos en servicio. N designa el número de telescopios. Base y diámetro se expresan en metros. I designa el modo imagen, V el modo visibilidad y A el modo astrometría.*

**CEFEIDAS** y **RR-LYRAE** son dos clases de estrellas variables que se utilizan como indicadores de distancia.

El brillo aparente de una estrella de **MAGNITUD 16** es 100.000 billones de veces más pequeño que el del Sol.

espacial *Hubble* en el ultravioleta—. La competición se ha animado: la intereferometría con tres telescopios rivalizará pronto con los mayores telescopios que se puedan construir nunca, incluso si están dotados de una óptica adaptativa.

¿Cuál es la situación presente? Hoy en día, los astrónomos disponen de ocho interferómetros ópticos y los proyectos se multiplican. Actualmente están en servicio: PTI (*Palomar Testbed Interferometer*) en el monte Palomar al sur de Los Ángeles, IOTA (*Infrared Optical Telescope Array*) en el monte Hopkins en Arizona, I2T y ahora GI2T (Gran Interferómetro de 2 Telescopios) en la meseta de Calern al sur de Francia, COAST en Gran Bretaña, NPOI en Arizona, ISI (*Infrared Spacial Interferometer*) en el monte Wilson, y finalmente SUSI (*Sydney University Stellar Interferometer*) en Australia (véase la tabla 1). Europa participa de forma espectacular en esta explosión de la interferometría con la construcción del gran interferómetro VLTI (*Very Large Telescope Interferometer*) que se destina a la imaginería (véase la tabla 2).

Instalado en un lugar excepcional en Cerro Paranal al norte del desierto de Atacama en Chile, el VLTI combinará a la vez una muy alta resolución angular con sus 200 metros de base y una gran sensibilidad con sus cuatro espejos de 8 metros de diámetro corregidos por óptica adaptativa. Se le añadirán telescopios más pequeños de 1,80 metros de diámetro. Está previsto que en 1997 funcione un primer telescopio de ocho metros. La obtención de las primeras franjas con dos telescopios está planificada para 1998.

Al principio del próximo siglo entrará en servicio su competidor norteamericano, el Keck Interferometer, con dos telescopios de 10 metros de diámetro y quizá pequeños telescopios auxiliares de 1,50 metros de diámetro. Hasta entonces están programados y se empezarán a realizar otros proyectos que utilizan telescopios de alrededor de un metro de diámetro, especialmente CHARA. Con estos instrumentos y diversos proyectos, la comunidad de los astrónomos ópticos dispone a partir de ahora de un potencial tecnológico equivalente al que ha disfrutado la interferometría durante los últimos veinte años.

La interferometría del futuro también se hará en el espacio con al menos dos grandes proyectos totalmente dedicados a la astrometría: el proyecto norteamericano SIM (*Space Interferometry Mission*), y GAIA (*Global Astrometric Interferometer for Astrophysics*), potencial piedra de clave del programa Horizon 2000+ de la ESA (Agencia Espacial Europea). El proyecto SIM está financiado por la Agencia Espacial Americana. Ya se ha iniciado la construcción de un prototipo (véase la fotografía de la página siguiente). El instrumento está constituido por tres interferómetros, alineados sobre un eje, las longitudes de cuyas bases son variables. Dos interferómetros sirven para el guiado del satélite apuntando a dos estrellas de referencia, mientras que el tercero realizará la medición científica propiamente dicha.

## La Agencia Espacial Europea estudia un proyecto ambicioso (GAIA) que podría competir con el instrumento norteamericano SIM

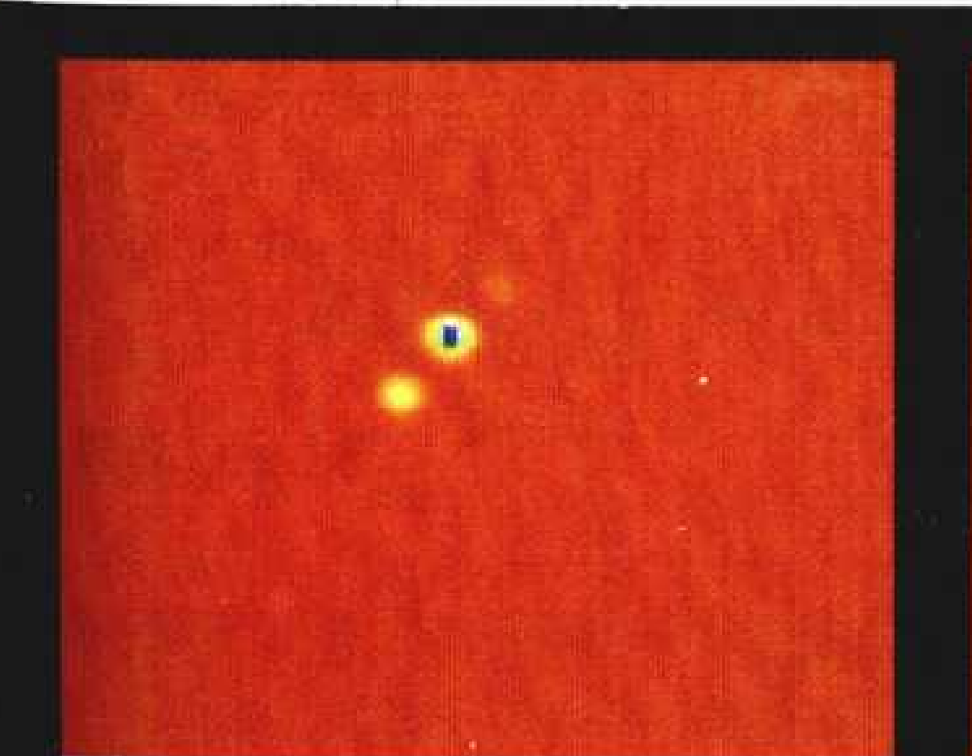
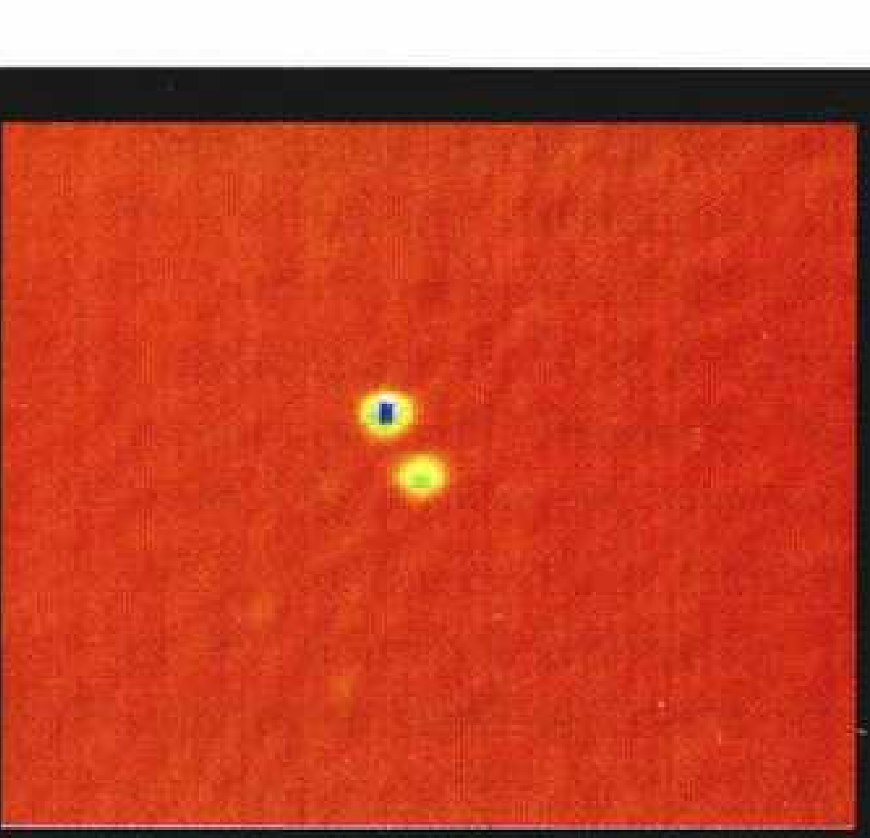
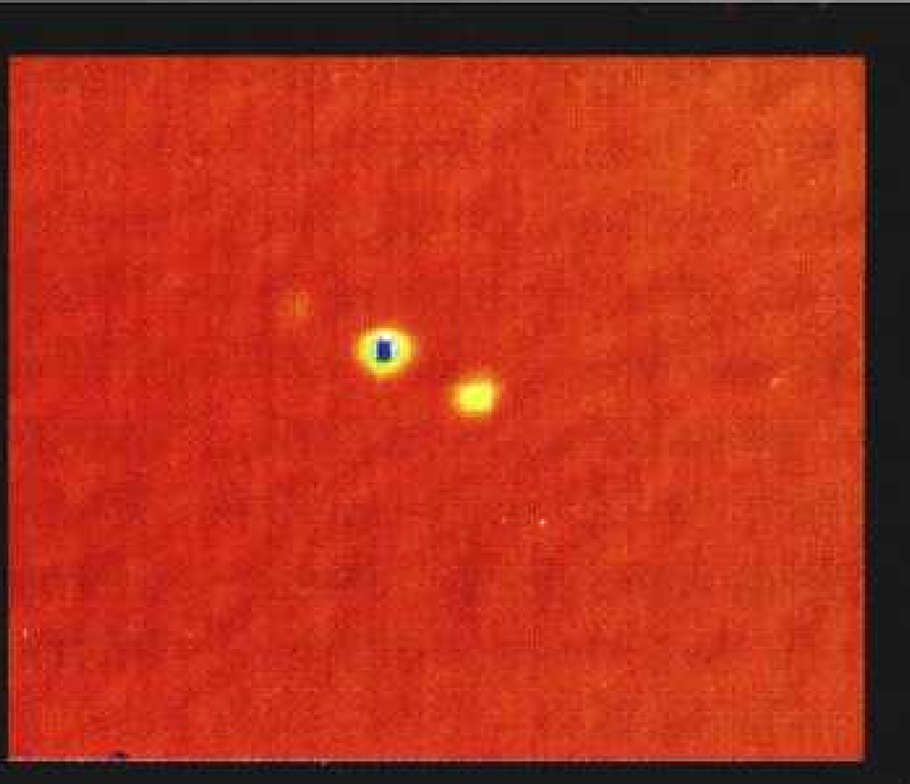
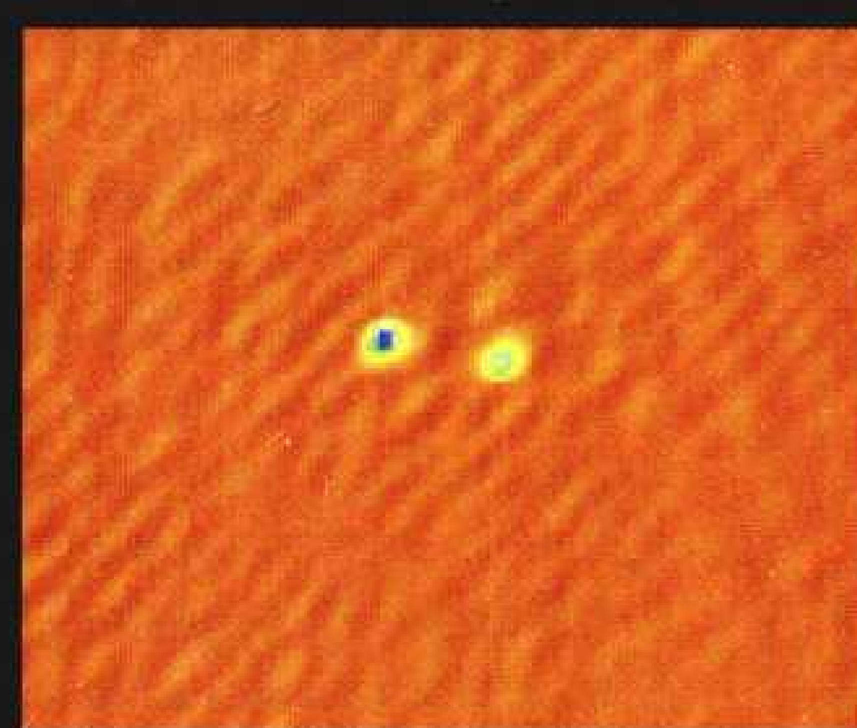
El lanzamiento de SIM está programado para el año 2003. Escrutará el cielo durante más de cinco años con objeto de medir la posición, la distancia y el movimiento propio de algunas decenas de miles de estrellas, algunas de las cuales son millones de billones de veces menos brillantes que el Sol. Estas estrellas se seleccionarán por su interés científico (búsqueda de planetas extrasolares, estrellas Cefeidas* y RR-Lyrae*, etc.). Los datos tendrán una precisión de 5 microsegundos de arco.

En Europa, se está discutiendo la realización de GAIA.[6] La puesta en marcha del proyecto se decidirá en 1998. Ya que compite con el proyecto DARWIN cuyo objetivo es buscar trazas de vida en el

| | PAÍS | | N | BASE | DIÁMETRO | MODO | DESDE | COSTE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CHARA | Estados Unidos | tierra | 5 | 360 | 1 | I | 1998 ? | 5,5 |
| VLTI | Europa | tierra | 4+2 ? | 200 | 8/1,8 | I/A | 1998 | 40 |
| Keck | Estados Unidos | tierra | 2+4 | 100 | 10–1,5 | A/I | 2000 ? | 25 |
| SIM | Estados Unidos | espacio | 3 | 10 | 0,33 | A/I | 2003 | 100 |
| GAIA | Europa | espacio | 2–3 | 3 | 0,50 | A/I | 2010 ? | 840 |

*Tabla 2. Proyectos de interferómetros. N designa el número de telescopios. Base y diámetro se expresan en metros. I designa el modo imagen y A el modo astrometría. Los costes se expresan en millones de dólares.*

(6) M. Shao y D. Wolff, Conferencia SPIE, 2.477, 228, 1995.

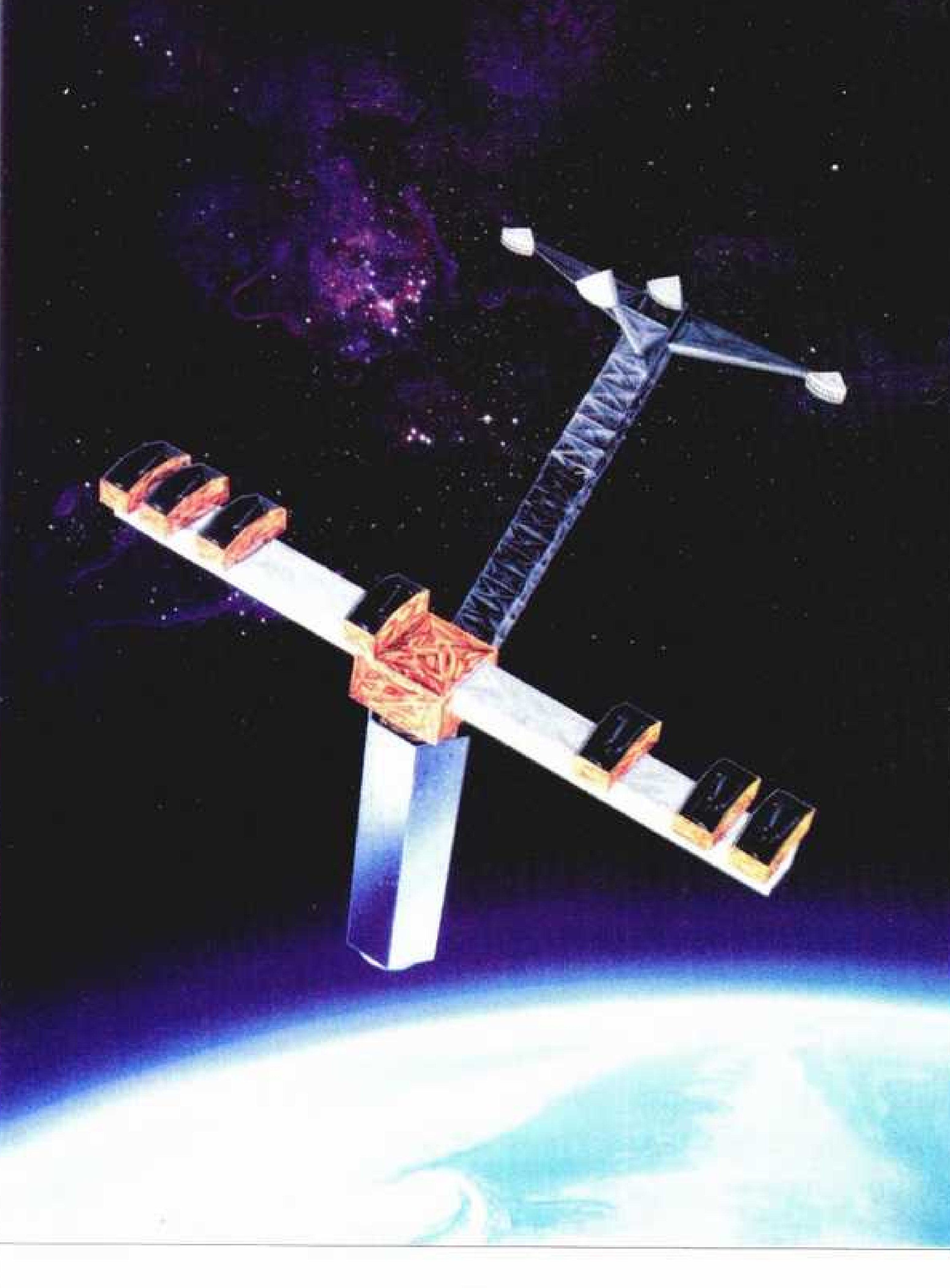





Universo.[II] Si se selecciona *GAIA*, será el sucesor de la misión astrométrica Hipparcos[7] que terminó en marzo de 1993 (el catálogo Hipparcos se publicará en 1997 y contendrá el paralaje, la posición con una precisión de un milisegundo y el movimiento propio con una precisión de un milisegundo por año de 120.000 estrellas). *GAIA* consiste en una superposición de dos (incluso quizá tres) interferómetros. Tiene que mejorar las prestaciones de su predecesor —que no es un interferómetro, sino un telescopio único— en un factor 100, no solamente en la precisión astrométrica (unos 20 microsegundos de arco) sino también en el número de estrellas observadas (unos cincuenta millones).

Mientras que los interferómetros de *SIM* estarán fijos y sólo permitirán la observación simultánea de algunas estrellas, los de *GAIA* girando continuamente alrededor de un mismo eje y observarán simultáneamente miles de estrellas separadas en el cielo por un ángulo de cerca de 60 grados. De este modo, *GAIA*, durante su misión de cinco años, barrerá varias veces el conjunto de la esfera celeste. Se trata de un proyecto del tipo llamado «survey», es decir que se observarán sin distinción alguna todas las estrellas más brillantes que la magnitud 16*. El reverso de la medalla es que la precisión de *GAIA* será inferior en un factor 10 a la de *SIM*.

¿Qué se espera saber de más con este tipo de instrumentos? Medir el diámetro de las estrellas sigue siendo un objetivo importante de la interferometría. Aunque aparentemente modesto, el diámetro de una estrella es una información fundamental para los astrónomos. Permite, en función del flujo de luz recibido en la Tierra, determinar su temperatura y, *a posteriori*, precisar su estructura y afinar los modelos de evolución de las estrellas en general. Combinando las observaciones a diferentes longitudes de onda se pueden analizar las capas superficiales de las estrellas y deducir cómo varía su composición química en función de la profundidad en el interior del astro. En este momento se conoce de forma precisa el diámetro de más de una cincuentena de estrellas que sirven de patrón para la física estelar. Otro tema de interés para la física estelar es la medición de las órbitas de las estrellas dobles: acoplada a medidas espectroscópicas permitirá determinar con precisión su masa. En el caso de las estrellas llamadas variables, la interferometría también ofrece un potente medio de ver incharse y desincharse su fotosfera.

Entre estas aplicaciones fascinantes también se encuentra la detección, y eventualmente la imaginería, de nuevos sistemas planetarios, un campo actualmente en plena efervescencia.[III] El interferómetro *PTI* que sirve de precursor al proyecto espacial *SIM* se dedica a este tipo de investigación. Ha sido construido hace poco en monte Palomar y de momento funciona en modo astrométrico de muy pequeño campo: en otras palabras, mide las posiciones de estrellas previamente seleccionadas respecto a puntos de referencia extraordinariamente próximos. Puede observar simultáneamente dos astros muy próximos en el cielo, distantes algunos segundos de arco solamente. De este modo se pueden superar bastante radicalmente los nefastos efectos de la atmósfera. En efecto, si dos estrellas están próximas se puede considerar que los rayos luminosos que envían atraviesan la misma zona atmosférica y son, en definitiva, degradados de la misma forma. La precisión astrométrica del sistema binario es tanto mejor cuanto más próximas están las estrellas, esto se ha demostrado teóricamente y comprobado experimentalmente.[8]



*Visión artística del interferómetro SIM (Space Interferometry Mission) cuya entrada en servicio está prevista para el año 2003. Constituido por tres interferómetros, SIM realizará las determinaciones astrométricas más precisas jamás logradas. (Foto JPL/NASA.)*

**Con los interferómetros del próximo siglo, los astrónomos esperan poner fin a la controversia sobre la constante de Hubble**

Finalmente, entre las repercusiones astrofísicas que se esperan de la misión GAIA, se confía en una mejor estimación de las escalas de tiempo y de espacio de nuestro Universo en expansión y, en particular, de su edad. Los futuros interferómetros astrométricos espaciales proporcionarán unas medidas directas y muy precisas de las distancias de las estrellas Cefeidas* de galaxias vecinas (Gran Nube de Magallanes) que sirven de patrón. De ahí un mejor conocimiento del coeficiente de proporcionalidad entre la velocidad de fuga de las galaxias y su distancia, es decir la famosa constante de Hubble.

Si bien los proyectos espaciales ponen en juego unas sumas colosales, presentan algunas ventajas técnicas: supresión de la atmósfera, vibraciones reducidas, reglajes más fáciles y precisos. De momento, la interferometría óptica con tres telescopios, cuya factibilidad se acaba de demostrar, sólo está en sus comienzos. En los próximos años, es de esperar que todos los pequeños interferómetros en tierra actualmente en servicio integrarán esta técnica. Se ha abierto el camino hacia una astronomía óptica de muy alta resolución.

**S.I. y G.P.** ■

■ ***En el web***
http://huey.jpl.nasa.gov/~shaklan/olbin/

*Mundo Científico* ha publicado:
**(I)** «La óptica adaptativa: ¿una revolución en astronomía?», nº 109, enero, 1991.
**(II)** «Estrategia de Investigación y perspectivas», nº 173, noviembre, 1996.
**(III)** «Los nuevos planetas», nº 173, noviembre, 1996.

**(7)** L. Lindegren y M.A.C. Perryman, *Astron. and Astrophys. Supl. Ser.*, *116*, 579, 1996.
**(8)** M. Shao y M.M. Colavita, *Astron and Astrophys.*, *262*, 353, 1992.

# Un rito de pasaje

*Hervé Le Bras*

HERVÉ LE BRAS es director de estudios de la EHESS.

Ha sido prudente no instituir un premio Nobel de demografía o sociología. Las escuelas rivales se hubieran sacado los ojos. La academia sueca se habría visto acusada, según los años, de poblacionismo, maltusianismo, marxismo, sociobiologismo... Pero, ¿por qué conceder un premio Nobel de literatura y no uno de pintura o de música? ¿Por qué un Nobel de la paz y no uno de derecho o de administración? Es un secreto a voces: aunque los premiados son excelentes, no necesariamente son los mejores. No se les distingue para estimular su disciplina, sino para que la ciencia y los científicos se reintegren a la sociedad. La literatura y la paz simbolizan este pasaje iniciático.

La física, con sus misteriosas partículas, la biología, con sus framentos de DNA de inquietante poder, la astronomía y su big bang o sus cuásares, la química con sus moléculas gigantes, son ciencias situadas al margen de la sociedad. Se mueven por un espacio infinitamente grande, donde encuentran una materia dotada de propiedades inhabituales: horriblemente caliente, evanescente, ultrarrápida o lo contrario. Como si fuera un domador o un cazador, el especialista en la materia o en la vida se aventura por un territorio peligroso. Durante su periplo, se vuelve él también un poco salvaje. A su regreso, hay que exorcizarlo para que recupere un lenguaje normal y vuelva a congeniar con objetos y seres a su escala. Hay que introducir también en el mundo ordinario los saberes extraños que ha adquirido fuera de la sociedad,o más exactamente socializarlos.

El premio Nobel, por lo tanto, forma parte de los ritos de reintegración. Es un retorno del sabio al seno de la humanidad global. La literatura y la paz son sus símbolos. La literatura, porque representa la extensión y la globalidad de los conocimientos del hombre de la calle por oposición a la especialización cada vez más estrecha de la ciencia, como ha demostrado Milan Kundera en su arte de la novela. La paz, porque expresa el triunfo de los vínculos sociales sobre las divisiones, especialmente las engendradas por la competencia entre sabios y por la subdivisión de las disciplinas. Como todo ritual, el Nobel reserva un papel al formalismo. Es importante que el galardón sea concedido por un rey como si se tratara de armar caballeros, mediante una ceremonia solemne en la que impetrantes y asistentes visten esmoquin o trajes de noche, pajaritas y diademas. Incluso el nombre del premio es significativo: Nobel se pronuncia exactamente igual que «noble» en inglés. Los científicos y la ciencia se ennoblecen en una fecha que, como todas las ceremonias rituales, es inalterable, tal vez un día fijado por la alineación de un Stonehenge o grabado en runas y conocido sólo por el rey de Suecia.

Una vez recibida esta unción o este santo carisma, los premiados se ponen a hablar en todas las lenguas como los santos después de Pentecostés: opinan sobre todos los temas habidos y por haber. Es un poco cómico, pero significa que se han convertido en verdaderos ciudadanos generalistas. Se han reintegrado al mundo civil y, en su estela, la ciencia se ha convertido también en un campo como otro cualquiera. Ésta es la razón por la que hay que conservar el premio Nobel y sobre todo sus ritos.

# Algunas razones para no rechazar el Nobel

*Jorge Wagensberg*



JORGE WAGENSBERG es físico y director del Museo de la Ciencia de Barcelona.

Es bien sabido que el más beneficiado de un premio no es el que lo recibe sino el que lo concede. Es el caso del editor y los premios literarios, de la industria del cine y los Oscars, de las instituciones y los premios institucionales, del mecenas y los premios con nombre propio... No está descartado, no, que el premiado resulte también honrado, prestigiado o bonificado. La duda es: ¿tiene el concepto-premio algún mérito a favor de la creación de conocimiento, esto es, algún valor para el resto de la comunidad? Hace mucho que tengo la convicción de esta duda, por lo que durante un tiempo estuve intrigado conmigo mismo: ¿cómo reaccionaría ante un premio? Lo supe llegado el momento: cobardemente. La desconocida joven que me daba la noticia parecía tan eufórica, que me pareció injusto arrojarle un cubo de agua fría por teléfono. Luego vino la vacilación por el temor a ofender y más tarde fue ya demasiado tarde.

El *Nobel de...* es actualmente un superlativo aplicable a cualquier otra clase de premio (la medalla Fields: el Nobel de matemáticas, el Hutchinson: el Nobel de ecología,...). La Academia Sueca de Ciencias es sin duda la más célebre de las academias y los científicos que ganan su premio se consagran para casi todo y para casi siempre. El Premio Nobel es además, al estilo del medallero olímpico, un índice de la exitosidad científica por naciones. Pero hay que reconocer que El Nobel ha conseguido también transmitir la idea de que la entidad dadora no es ya la memoria de Alfred Nobel o la propia Academia, sino la comunidad científica o acaso, justamente, la humanidad entera. El ganador del Nobel que logra asumir esta idea se ahorra el tremendo ejercicio de arrogancia masoquista que supone la tentación de rechazarlo.

Simplificando mucho, si el mayor beneficiario de un premio es el que lo concede y el Nobel lo concede, digamos, la propia humanidad, entonces el Nobel es un premio que la humanidad se concede a sí misma. No hay problema. El premio se puede aceptar. Con todo, la humanidad que recibe el premio es la de hoy, mientras que la humanidad que lo concede es, en muchos aspectos, la de hace un siglo. Y un siglo es en ciencia lo que un milenio en religión o diez millones de años en evolución. La física, la química y la medicina siguen siendo disciplinas fundamentales para vivir. Y la literatura, la economía y la paz altamente recomendables para vivir y para convivir. Sin embargo, la naturaleza no vela por la vigencia de las bases de un premio. Estirando la física fundamental se puede conceder el Nobel a la ingeniería concreta y estirando la medicina concreta se puede premiar la biología fundamental. Pero resulta difícil alcanzar con el Nobel otras cuestiones de hoy como la matemática de la información, las ciencias del entorno, la arquitectura, o el urbanismo. El Nobel no es un estímulo que favorezca la actual manera de hacer ciencia: en equipo y en terrenos interdisciplinarios. Los premios de las tres ciencias experimentales son los de mayor objetividad y sirven quizá para teñir de reconocida solvencia a los otros tres que tratan de la complejidad humana: el de literatura célebre por sus presencias olvidadas y notorias ausencias, el de la paz célebre por sus tragicómicas contradicciones y el de economía que la realidad suele empeñarse en desmentir rápida y minuciosamente. Pero asumidos éstos, ¿por qué olvidar otra vasta disciplina, antigua y gloriosa, que tanto nos ayuda a existir? Picasso, Stravinsky, Casals, Heifetz, Warhol, Nuyerev, Bacon... son nombres con nobles resonancias nobélicas...

# LOS MOVIMIENTOS SACÁDICOS DE LA MIRADA

Alain Berthoz, Laurent Petit

## Un estudio de los circuitos de la decisión y de la imaginación motriz

**ALAIN BERTHOZ**
Laboratorio de fisiología de la percepción y de la acción. Es profesor del Collège de France-CNRS, París.
**LAURENT PETIT**
Grupo de imaginería neurofuncional, GIP Ciceron, Caen, y equipo de acogida 1.555 del MESR.

Aunque no son coautores de este artículo, deseamos precisar que los trabajos de imaginería recogidos aquí fueron iniciados por el profesor **A. SYROTA**, y realizados con **B. MAZOYER**, **N. TZOURIO**, **C. ORSSAUD**, **G. SALOMON**, **W. LANG** y **P. HOLLIGER**, de la Universidad de Viena. Actualmente, se han prolongado con estudios de imaginería por resonancia magnética con **DENIS LE BIHAN**, **A. LEROY-VILLIG** y **ELIE LOBEL**.

Los estudios con la cámara de emisión de positrones en las estructuras activadas durante los tirones oculares han sido realizados en el Centro de Imaginería del CEA, en el hospital Frédéric-Joliot, de Orsay.

**¿Qué ocurre en el cerebro cuando el ojo es atraído por alguna cosa o cuando decidimos mirar un objeto, un paisaje o la carretera que desfila ante nosotros? Practicada en animales, la electrofisiología nos proporciona un conocimiento cada vez más fino de las cascadas de procesos incitadores o inhibidores. La imaginería cerebral permite efectuar experimentos complementarios que nos informan sobre los bucles de retroacción entre las áreas corticales y el cerebro profundo. Una inmersión hasta el fondo de una complejidad inaudita.**

El primer movimiento de captura que aparece en el niño, mucho antes de que pueda asir con la mano o hablar, es el tirón ocular (o movimiento sacádico), un movimiento fundamental en la exploración visual. Actualmente, se conocen las redes locales de neuronas que controlan los movimientos sacádicos y se está muy cerca de descubrir los mecanismos que producen los tirones orientados hacia unos objetivos memorizados. Por lo tanto, estamos ante un modelo válido no sólo para la atención selectiva, sino también para la memoria espacial.

El tirón ocular es el cambio de dirección de la mirada producido por el sistema oculomotor cuando el ojo se desplaza con un salto brusco. Este salto dura solamente entre 20 y 150 milisegundos y alcanza velocidades de 800 grados por segundo. Es el movimiento más rápido que podemos hacer. Cada tirón se compone de un movimiento breve seguido por un ajuste más lento del desplazamiento del ojo, que puede, a su vez, estar seguido de un tirón de corrección.

Si pedimos a un sujeto que mire el rostro de una mujer, el trayecto oculomotor (es decir, la secuencia de los desplazamientos oculares) recorrido para explorar este rostro será completamente diferente según se le pida que diga si esta mujer es rica, triste, está bien peinada o tiene las orejas despegadas... De igual manera, si pedimos que se mire un paisaje y se analice la escena para ver si hay animales o árboles o si el cielo es claro, los trayectos oculomotores serán diferentes. Explorar un rostro o una escena del entorno exige, pues, decisiones cognitivas complejas, por lo que se comprende que el tirón sea un modelo interesante para el estudio tanto de la selección motriz como de los procesos de decisión.

Sin entrar en detalles sobre los mecanismos neuronales que conducen a la producción de los tirones, examinaremos las principales etapas de esta producción para ganar en un concepto general lo que perderemos en finura de análisis. Examinaremos este sistema a partir de su salida, es decir, de los centros motores del tronco cerebral, y nos desplazaremos poco a poco hacia el córtex. Este método de abajo a arriba es, en cierto modo, contrario al proceso, aparentemente más natural, que habría consistido en partir de la retina y examinar las etapas sucesivas del análisis de las imágenes que conducen a una orden motriz. Nuestro enfoque está dictado por el objetivo que perseguimos. Queremos demostrar que existe una organización jerárquica de ejecución de los tirones que permite el bloqueo de la ejecución a diferentes niveles mediante mecanismos inhibidores. De este modo, queremos también sugerir que durante el movimiento imaginado del ojo y el movimiento ejecutado se ponen en marcha las mismas estructuras neuronales. Nuestro proceso también pretende sostener el punto de vista de que el cerebro no funciona únicamente como una máquina biológica que efectúa transformaciones sensomotrices valiéndose de mecanismos secuenciales: a varios niveles del tratamiento, las órdenes motrices influyen en el tratamiento de los datos sensoriales.[1,2] El hecho de partir de la orden motriz significa, pues, tomar la acción como elemento esencial del funcionamiento neuronal y considerarla como organizadora de la percepción en vez de buscar el modo en que la percepción determina la acción.

La figura 1 muestra un diagrama en el cual se resumen las operaciones neuronales que intervienen en el control de los movimientos sacádicos. Evidentemente, no es exhaustivo. Hay que recorrerlo de manera sintética y luego retroceder a cada una de las etapas. Su finalidad no es mostrar el detalle de los circuitos neuronales que contribuyen a que se produzca un tirón o un movimiento de orientación gracias a un movimiento coordinado de ojos y cabeza, sino apoyar la idea de que la decisión de hacer un movimiento de los ojos, acompañado o no de un movimiento de la cabeza, se toma a través de una jerarquía de mecanismos paralelos excitadores e inhibidores.

### El arranque de actividad inicial determina la velocidad del tirón, señal enviada por el conjunto del cerebro a los músculos de los ojos

Si consideramos primero la última fase de la ejecución, el tirón ocular se produce por la descarga de neuronas motrices que activan las fibras motrices de los músculos de los ojos, las llamadas motoneuronas. Éstas descargan con una modulación de su frecuencia muy particular, constituida por un arranque de actividad fásica* muy viva, seguida de una descarga tónica* que permite mantener el ojo en la nueva posición. El arranque de actividad al principio de la descarga de las motoneuronas está destinado principalmente a vencer la viscosidad del ojo, bañado en los tejidos del globo ocular, y permitir que el tirón se ejecute en algunas decenas de milisegundos. Las teorías y los experimentos hechos desde hace unos diez años han demostrado que estos dos componentes de la descarga de las motoneuronas, arranque de actividad fásica y descarga tónica, están controlados por mecanismos separados. En efecto, el arranque de actividad inicial, que determina la velocidad del tirón, es la señal enviada por el cerebro a las motoneuronas. La componente tónica se construye localmente,



**ARRANQUE DE ACTIVIDAD FÁSICA**
Actividad de una neurona en forma de una serie de potenciales de acción de alta frecuencia y de corta duración.

**DESCARGA TÓNICA**
Actividad de una neurona en forma continua de potenciales de acción.

**FORMACIÓN RETICULAR**
Zona del tronco cerebral en la cual las neuronas no están agrupadas en núcleos. *Póntica*: a nivel del puente (protuberancia); *mesencefálica*: a nivel del mesencéfalo.

**COLLICULUS SUPERIOR**
Llamado también *tubérculo cuadrigémino anterior*, núcleos pares situados en la parte superior de la cara posterior del tronco cerebral.

**EL CONTROL DE LOS MOVIMIENTOS DEL OJO**

velocidad de los movimientos del ojo
área motriz suplementaria
campo ocular suplementario
selección de las respuestas
memoria a corto plazo
áreas motrices
áreas premotrices
campos oculares frontales
córtex prefrontal
córtex parietal
striatum
tálamo
globo pallidus
núcleo subtalámico
áreas visuales primarias
inhibición
disfacilitación
cuerpo geniculado lateral
sustancia negra
selección espacial y temporal
reactualización dinámica
colliculus superior
neuronas de pausas
?
neuronas tecto-retículo-espinales
núcleo intersticial de Cajal
neuronas excitadoras fásicas
motoneuronas
ojo
posición del ojo
prepositus hypoglossi
descarga corolaria
neuronas excitadoras fásicas
velocidad
propiocepción
neuronas inhibidoras fásicas
neuronas reticuloespinales
acoplamiento ojo-cabeza
cuello
neuronas reticuloespinales
sólo cuello

*Figura 1. Este esquema, complejo, es una representación muy simplificada de los principales niveles de la organización cerebral que intervienen en los movimientos de los ojos y de la cabeza relacionados con la mirada. La decisión de girar los ojos, la cabeza o ambos en una dirección determinada para ver alguna cosa se toma a través de una completa jerarquía de mecanismos excitadores e inhibidores. El tirón ocular (abajo, a la derecha) está producido por unas neuronas excitadoras fásicas (NEF) situadas en la formación reticular póntica, cerca del núcleo abducente, y en la formación reticular mesencefálica (véase también fig. 2). Las informaciones sobre el movimiento y la velocidad del movimiento del ojo se envían hasta el córtex (flechas de la izquierda). Algunas NEF pueden ser inhibidas por neuronas de pausa, que determinan si el tirón se ejecutará o no. Estas neuronas de pausa son, a su vez, susceptibles de ser inhibidas por dos vías paralelas: una procedente de los campos oculares frontales, en el córtex, y la otra procedente (al menos en el simio) del colliculus superior (véase esquema página siguiente). Para exposición de los otros circuitos inhibidores y más detalles, véase el texto y ref. 2.*


(1)
A. Berthoz, *Leçon inaugurale*, Collège de France, Paris, 1993.
(2)
A. Berthoz, *Cognitive Brain Research*, 3, 101, 1996.
(3)
A. Berthoz et al., *Neuroscience Letters*, 72, 289, 1987.


en el tronco cerebral, mediante un mecanismo llamado integrador en el sentido matemático de la palabra, cuya implementación neuronal es extraordinariamente compleja y todavía poco conocida. Es este mecanismo el que, en cierta manera, transforma este arranque de actividad fásica en descarga tónica.

Se conoce la última neurona premotriz que produce esta actividad fásica y lanza el ojo hacia su nueva posición. Es la neurona excitadora fásica. Está situada en la formación reticular* póntica, próxima al núcleo abducente de los movimientos horizontales, y tiene equivalentes para los movimientos verticales en la formación reticular mesencefálica (fig. 2). Por tanto, hay dos generadores de tirones: uno para los movimientos horizontales, situado en la formación reticular póntica, y otro para los movimientos verticales y de torsión, situado en la formación mesencefálica. Estos dos generadores reciben una señal fásica del cerebro y la transforman en una orden fasotónica gracias a mecanismos neuronales locales llamados *integradores*. Se supone que hay dos integradores de los tirones para los dos tipos de movimientos. En el esquema se indican con el símbolo ∫.

Este circuito neuronal premotor, cada una de cuyas neuronas están hoy bien definidas, se encuentra bajo el control de un sistema inhibidor muy curioso que controla su funcionamiento de manera permanente. Algunas neuronas cuyo cuerpo celular está situado en la parte media de la formación reticular inhiben permanentemente las neuronas excitadoras fásicas. Para que pueda iniciarse el tirón, es necesario que estas neuronas suspendan su actividad, hagan una pausa: se las llama neuronas *de pausa* y constituyen, por tanto, un sistema de selección temporal del tirón, situado a nivel inmediatamente premotor.

Puede verse, pues, que el generador de movimiento sacádico puede ser activado por el cerebro, pero en realidad sólo puede producir un movimiento si la inhibición ejercida por las neuronas *de pausa* queda suprimida y si, para ello, estas neuronas son a su vez inhibidas por otras neuronas procedentes de las estructuras superiores del cerebro. Probablemente, la inhibición tiene lugar a través de dos vías paralelas: una que desciende directamente del córtex cerebral (córtex prefrontal, campos oculomotores frontales) y la otra que, verosímilmente, desciende del polo anterior (llamado rostral) del colliculus superior, por lo menos en el simio.

Lo esencial es comprender que la desinhibición de las neuronas de pausa define el breve instante en el cual es posible el tirón.

Un segundo nivel de bloqueo de la ejecución de los tirones se localiza a nivel del colliculus superior.* Se sabe que las neuronas de las capas intermedias del colliculus superior contienen neuronas de proyección, llamadas *neuronas tecto-retículo-espinales* (NTRE), que se proyectan hacia el tronco cerebral y la médula. Son neuronas importantes en la producción de movimientos de orientación de los ojos y de la cabeza.

El mecanismo exacto por el cual estas neuronas contribuyen a la generación de movimiento sacádico todavía es desconocido, pero resulta evidente que al menos una parte de ellas descargan en forma de un arranque de actividad que precede y acompaña el tirón.[3] Se proyectan directamente sobre las neuronas excitadoras fásicas o bien sobre otras neuronas intermedias situadas en el

**SISTEMA VISUAL**

tronco cerebral, así como sobre las neuronas reticuloespinales que intervienen en la producción del tirón ocular. La descarga de las NTRE codifica una variante dinámica, todavía mal definida, que guarda relación con lo que se llama error motor del tirón, es decir, la diferencia entre el lugar donde está el ojo en un momento dado y el que debe ocupar para posicionar la fóvea* sobre el objetivo. La naturaleza exacta de este error motor dinámico todavía no se ha precisado.

Cada una de estas neuronas lleva, inscrita en la anatomía de sus proyecciones hacia los generadores de movimiento sacádico, la dirección del tirón. Cada una de ellas codifica ciertos aspectos de la dinámica del tirón en su frecuencia de descarga y su dirección por la ramificación de su axón.[4,5] Un tirón horizontal es producido por las NTRE que se proyectan solamente sobre las neuronas del generador horizontal en el tronco cerebral; un tirón vertical, por las NTRE que se proyectan solamente hacia el generador vertical y de torsión en el mesencéfalo; un tirón oblicuo, por las NTRE cuyo axón se distribuye hacia los dos generadores. Es decir, la geometría del movimiento sacádico está codificada por la morfología y por la anatomía.

Una propiedad notable: estas neuronas de las capas intermedias están organizadas según un mapa retinotópico* en registro con las capas superficiales del colliculus superior. El colliculus representa el segundo nivel de bloqueo potencial de la ejecución del movimiento sacádico, porque este mapa motor se halla bajo un control inhibidor ejercido a partir de otra formación, la sustancia negra.* Desde hace poco tiempo, se sabe que la proyección de la sustancia negra hacia el colliculus superior está organizada de una manera extraordinariamente precisa, en el sentido de que neuronas de la sustancia negra inhibirán unas poblaciones de neuronas muy especiales, según una organización modular en el colliculus superior. Esto permite una verdadera selección espacial, ya que será posible inhibir los tirones efectuados en una dirección exacta del espacio.

Dicho de otro modo: el papel de la inhibición ejercida por la sustancia negra sobre el colliculus superior consiste en proceder no sólo a un bloqueo temporal del tirón, como ocurría con las neuronas de pausa, sino también a una selección espacial, regulando la orientación del movimiento del ojo.

Otro grupo de neuronas, localizadas en la parte anterior (rostral) del colliculus superior, descarga durante la fijación del ojo. Por consiguiente, existe un mecanismo independiente para fijar el ojo en la órbita. Así, pues, lo que podría llamarse una decisión espacio-temporal se elabora a nivel del colliculus superior y permite desplazar la atención visual de una zona del espacio a otra. Este mecanismo, llamado *atencional*, debe entenderse como una preparación motriz y se conoce con el nombre de teoría motriz de la atención.[6,7] La reacción para orientar la atención no es en absoluto sencilla, ya que implica en un grado muy elevado tratamientos multisensoriales y también, probablemente, mecanismos de muy alto nivel en los que intervendría el córtex cerebral e incluso la formación hipocámpica.*

**Una de las grandes mejoras que la evolución ha introducido en el cerebro del primate ha sido la multiplicación de los mecanismos inhibidores**

Tercer nivel de acción inhibidora: procede del *striatum*.* Acabamos de ver que el tirón ocular sólo puede producirse si la superficie del colliculus está libre de la acción inhibidora de la sustancia negra.[8] Esto significa que, a su vez, las neuronas de la sustancia negra están también inhibidas... y lo estarán gracias a las neuronas del núcleo caudado* del *striatum*,[9] las cuales descargan durante tirones voluntarios y son también activas cuando el animal efectúa movimiento sacádico hacia objetivos memorizados. Probablemente intervienen en el control cognitivo del comienzo del tirón.

Pero el proceso de selección de movimiento sacádico es todavía más complejo y sutil. Descubrimientos recientes muestran que, en paralelo con esta cascada de inhibiciones, en las que está implicado el núcleo caudado y la sustancia negra, la selección va acompañada y reforzada por una segunda cascada de inhibiciones y de excitaciones. Esta vía, que tiene como objetivo el colliculus y como estación terminal el núcleo subtalámico,* está formada por las neuronas siguientes: en primer lugar, una neurona inhibidora, localizada en el *striatum*, la cual se proyecta hacia el globus pallidus*, que, a su vez, se proyecta sobre otra neurona interneurona inhibidora; esta última se proyecta sobre el núcleo subtalámico. La neurona objetivo en el núcleo subtalámico es excitadora y se proyecta hacia una neurona inhibidora en la sustancia

**ZONAS SUBCORTICALES IMPLICADAS EN LOS TIRONES OCULARES**

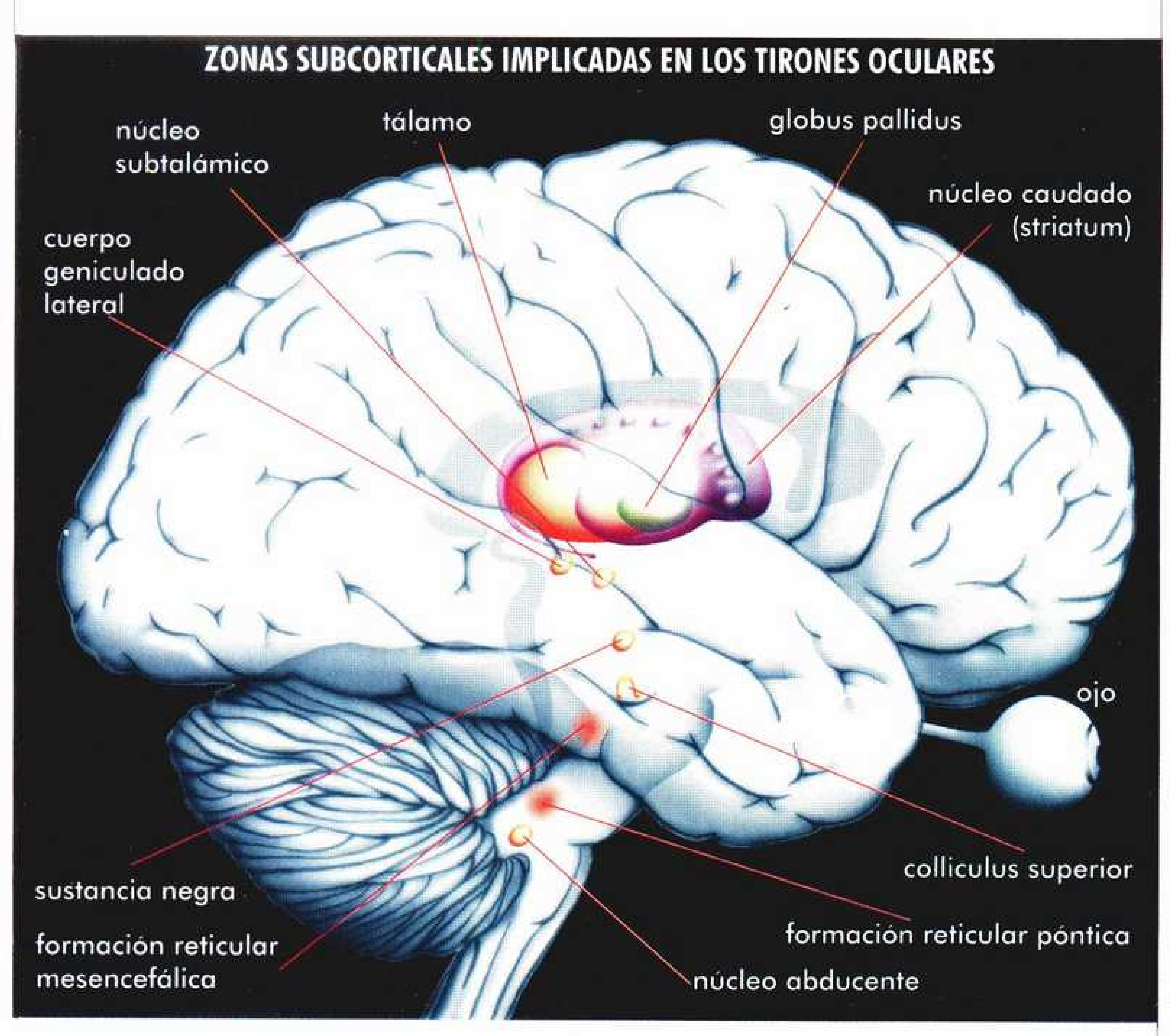



*Figura 2. Debajo del córtex, hay muchas zonas y núcleos cerebrales que intervienen en la ejecución, inhibición y control de los movimientos oculares. Tres etapas fundamentales de la inhibición son: a) las neuronas de pausa, cuyo cuerpo celular está situado en la parte mediana de la formación reticular; b) el colliculus superior; c) el núcleo caudado, en el striatum* (vía la sustancia negra). A esta cascada hay que añadir otra que implica también al colliculus, la sustancia negra y el striatum, pero también el núcleo subtalámico. El prepositus hypoglossi mencionado en la figura 1 se encuentra cerca de la parte mediana de la formación reticular.*

**FÓVEA**
Región de la retina situada cerca del centro, sensible a los detalles finos del entorno visual.

**MAPA RETINOTÓPICO**
Véase «La visión, una percepción subjetiva», *Mundo Científico*, nº 172, 1996.

**SUSTANCIA NEGRA**
También llamada *locus niger*, interviene en los circuitos dopaminérgicos y en el sistema de recompensa cerebral.

**FORMACIÓN HIPOCÁMPICA**
Circunvolución que rodea las formaciones subcorticales y que interviene en el sistema límbico.* Se le atribuyen funciones en la memoria espacial.


(4) A. Grantyn *et al.*, *Exp. Brain Res.*, 46, 243, 1982.
(5) A.B. Moschovakis *et al.*, *Jal Neurophysiology*, 60, 232, 1988.
(6) G. Rizzolatti *et al.*, «Space and selective attention», en C. Umiltà y M. Moscovitch (eds.), *Attention and performance XV*, Erlsbaum, Hillsdale, 232, 1994.
(7) C. Umiltà *et al.*, *Eur. J. of Cognitive Psychol.*, 6, 23-41, (Abstract), 1994.
(8) O. Hikosaka *et al.*, *J. Neurophysiol.*, 49, 1.268, 1983.
(9) O. Hikosaka *et al.*, *Exp. Brain Res.*, 95, 457, 1993.

negra que suprime la actividad en el colliculus, tal como lo hacen las neuronas de la primera vía.

Por tanto, la acción de esta segunda vía es la siguiente: activación de una neurona de entrada que produce una inhibición sobre la neurona del globus pallidus, relajando así la activación de la neurona subtalámica, la cual aumenta la inhibición de la sustancia negra con la consiguiente inhibición de las neuronas colliculares. Las neuronas subtalámicas mantienen una descarga tónica mientras el animal fija un objetivo que señala la anticipación de una recompensa. Por consiguiente, este mecanismo está íntimamente ligado a la toma en consideración de elementos contextuales para el desencadenamiento y modulación de los movimientos sacádicos.

Así, pues, la función de la inhibición es permitir la elección de un estímulo interno del movimiento, a fin de hallar la estrategia apropiada y la combinación de las sinergias. Una de las grandes mejoras introducidas por la evolución en el cerebro del primate ha sido la multiplicación de los mecanismos inhibidores, con lo cual ha sido posible, por una parte, que resultaran más sutiles la inhibición recíproca y la modulación de los reflejos o de los elementos del repertorio motor durante la acción voluntaria, así como la selección de nuevas sinergias, y, por otra parte, que se utilizaran —en nuestra opinión— para bloquear la ejecución de un movimiento, de tal manera que fuera posible la simulación interna de los movimientos planificados y se pudieran ensayar endógenamente sus consecuencias potenciales. El papel de la inhibición es, pues, esencial en el aprendizaje y la plasticidad. Finalmente, no hay que olvidar que cada nivel de estas cascadas de inhibición de otras partes del cerebro puede modificar las transmisiones.

Hace casi diez años, junto con Jacques Droulez y Pierre Paul Vidal, propusimos la idea de que el movimiento no está controlado solamente por bucles sensomotores continuos dispuestos de manera cibernética. En paralelo, intervienen otros bucles internos al cerebro, en los cuales el movimiento puede ser estimulado, aunque sin ser ejecutado, lo que permite hacer predicciones y seleccionar las estrategias motrices. Esta teoría obtuvo recientemente un apoyo: el descubrimiento del papel funcional de unos circuitos que enlazan los ganglios basales,* el tálamo* y el córtex. Ahora bien, estos bucles internos hacen intervenir las estructuras del córtex, que volveremos a hallar en los experimentos con imaginería cerebral. Por ejemplo, parece que en los movimientos de los ojos interviene un circuito especializado que enlaza el campo oculomotor frontal y el campo oculomotor suplementario con los ganglios basales y el tálamo (fig. 3). Esto parece indicar que los movimiento sacádico no son producidos por simples secuencias que van desde la retina hacia el córtex y luego al colliculus y al tronco cerebral en cadenas sensomotrices, sino que están perfectamente organizados en bucles modulares.[10] El bloqueo a nivel del colliculus deja perfectamente libre de funcionamiento el bucle que implica al córtex, el ganglio basal y el tálamo. Si no hay ejecución de movimiento sacádico, estos bucles internos pueden, por tanto, intervenir en la estimulación interna y la predicción de los efectos del desplazamiento de la mirada antes —o sin— que éste se efectúe.

Con un criterio muy parecido, el japonés Hikosaka ha propuesto recientemente un circuito teórico en el cual una *recompensa* puede influir en estos bucles internos uniendo los ganglios basales, el tálamo y el córtex.[11] Los ganglios basales harían el papel de coordinador entre las diferentes áreas corticales implicadas en la elaboración de una estrategia motriz. Estas zonas estarían funcionalmente conectadas gracias a un aprendizaje basado en la recompensa. Al principio de un aprendizaje, las salidas de tales áreas corticales convergerían, a su vez, en los ganglios basales. Durante el aprendizaje, una asociación entre la convergencia motriz y las señales de recompensa procedentes del sistema límbico* seleccionaría, a nivel de los ganglios basales, únicamente las combinaciones de entradas corticales que conducen a una recompensa. Así pues, estaríamos ante una modalidad de selección que todavía es más compleja y sutil que la de un simple bloqueo como el que se ha descrito a nivel del tronco cerebral, más compleja también que la selección espacio-temporal a nivel del colliculus. Vemos claramente que se produce una *reaferencia* interna de las seña-

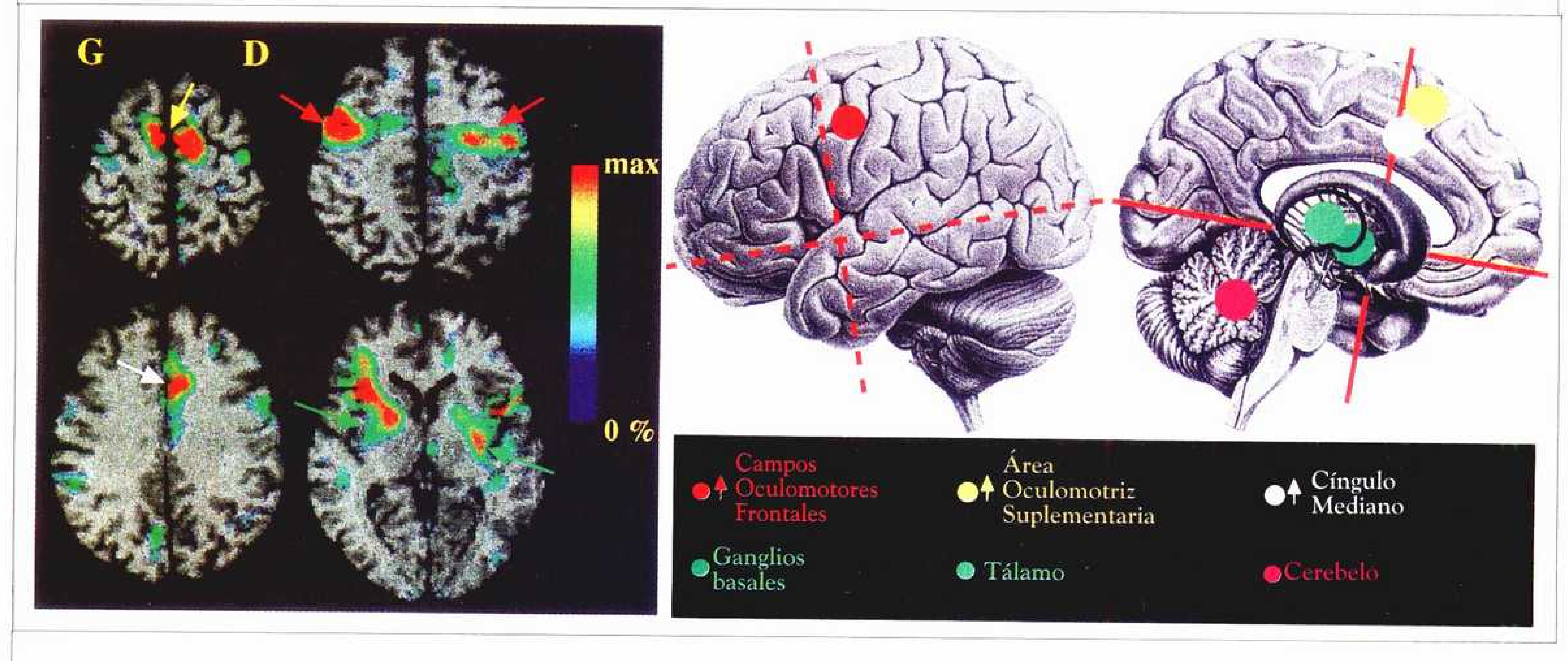



**Figura 3. Ejecución de movimientos sacádicos horizontales voluntarios en oscuridad completa.** *A la izquierda: mapas de activación de un sujeto que representan la diferencia entre los mapas de flujo sanguíneo cerebral tomados en la ejecución de tirones y los tomados en una condición de referencia en la que el sujeto está en reposo, con los ojos abiertos en la oscuridad. La escala de color indica la intensidad de la activación en porcentaje de aumento del flujo sanguíneo cerebral. A la derecha: regiones corticales y subcorticales que intervienen en la ejecución de tirones horizontales voluntarios. El eje horizontal, en rojo, corresponde al plano bicomisural, y el vertical, al plano ortogonal que pasa por la comisura anterior. Método: mapas de activación obtenidos en TEP a diferentes niveles de corte se han superpuesto sobre los cortes anatómicos correspondientes obtenidos en IRM. Estos resultados han servido de referencia para los experimentos de las figuras 4, 5 y 6.*

**STRIATUM**
Parte del cuerpo estriado que contiene, principalmente, el núcleo caudado. Desempeña un papel inhibidor sobre el pálido, que controla el tono muscular y la coordinación de los movimientos automáticos elementales.

**NÚCLEO CAUDADO**
Formación en herradura que rodea el tálamo.

**NÚCLEO SUBTALÁMICO**
Llamado también *cuerpo de Luys*, interviene en los movimientos de balanceo en la locomoción.

**GLOBUS PALLIDUS**
o *pálido*. Parte interna del núcleo lenticular lindante con el núcleo caudado (véase *striatum**).

**GANGLIOS BASALES**
Expresión que designa el *striatum** (núcleo caudado y putamen), el globus pallidus* y un núcleo de la parte mediodorsal del lóbulo temporal, la amígdala.

**TÁLAMO**
Conjunto de núcleos grises centrales de una gran complejidad, centro de tratamiento de las vías sensitivas y sensoriales.

**SISTEMA LÍMBICO**
Serie de formaciones, especialmente el córtex cingular, el septo, el hipocampo y la amígdala.

(10)
G.E. Alexander *et al.*, *Ann. Rev. Neurosci.*, 9, 357, 1986.

(11)
O. Hikosaka, «Role of the basal ganglia in motor lerning: a hypothesis», en T. Ono *et al.* (eds.), *Brain mechanisms in perception and memory. From neuron to behavior*, Oxford University Press, Oxford, 497, 1994.

les a todos los niveles de tratamiento. Así pues, la posición del ojo en la órbita influye en el tratamiento cortical de las informaciones visuales. Influye también en la descarga de las neuronas secundarias del reflejo vestíbulo-ocular,* las neuronas del tálamo, etc. Por tanto, la reaferencia de posición o de velocidad del ojo a la salida del integrador está dirigida a diversos niveles del cerebro para operaciones de cambio de coordenadas, de percepción, de coordinación entre los movimientos de los ojos y de las otras partes del cuerpo, etc. Sin embargo, la distribución precisa de estas informaciones y su papel exacto todavía no se conocen.

Actualmente, uno de los límites de la imaginería por TEP o IRM es no poder distinguir entre las señales neuronales relacionadas con órdenes motrices y las relacionadas con reaferencias internas.

prosecución, etc. En el hombre, su activación durante los movimientos sacádicos ha podido ser demostrada mediante algunos trabajos de pioneros.(12,13) Su localización en el *gyrus* precentral quedó definitivamente probada con el trabajo que nosotros llevamos a cabo junto con el equipo del SHFJ de Orsay. El *gyrus* precentral es activado en los tirones voluntarios horizontales en la oscuridad, es decir, sin ningún objetivo presentado al sujeto (fig. 3), pero también en la fijación ocular(14) (fig. 4) y en secuencias de tirones memorizados.(15,16) En este último experimento, el sujeto tenía que repetir en la oscuridad completa una secuencia de cinco tirones hacia unos objetivos que le habían sido presentados anteriormente en el plano horizontal (fig. 5). De manera general, el *gyrus* precentral queda activado durante todos los movimientos de tiro-

en relación con el córtex parietal, prefrontal y cingular (fig. 2).

Las neuronas de la AMS están dispuestas según una especie de mapa del cuerpo, como en el córtex motor (somatotopía). Por ejemplo, en el hombre se obtienen movimientos del rostro por estimulación de la parte anterior. Esto ocurre también en el simio. Las proyecciones de los axones de la AMS hacia las neuronas del córtex motor son muy precisas, lo que no significa que esta estructura controle músculos separados. Puede controlar, en cambio, grupos de músculos, sinergias motrices.

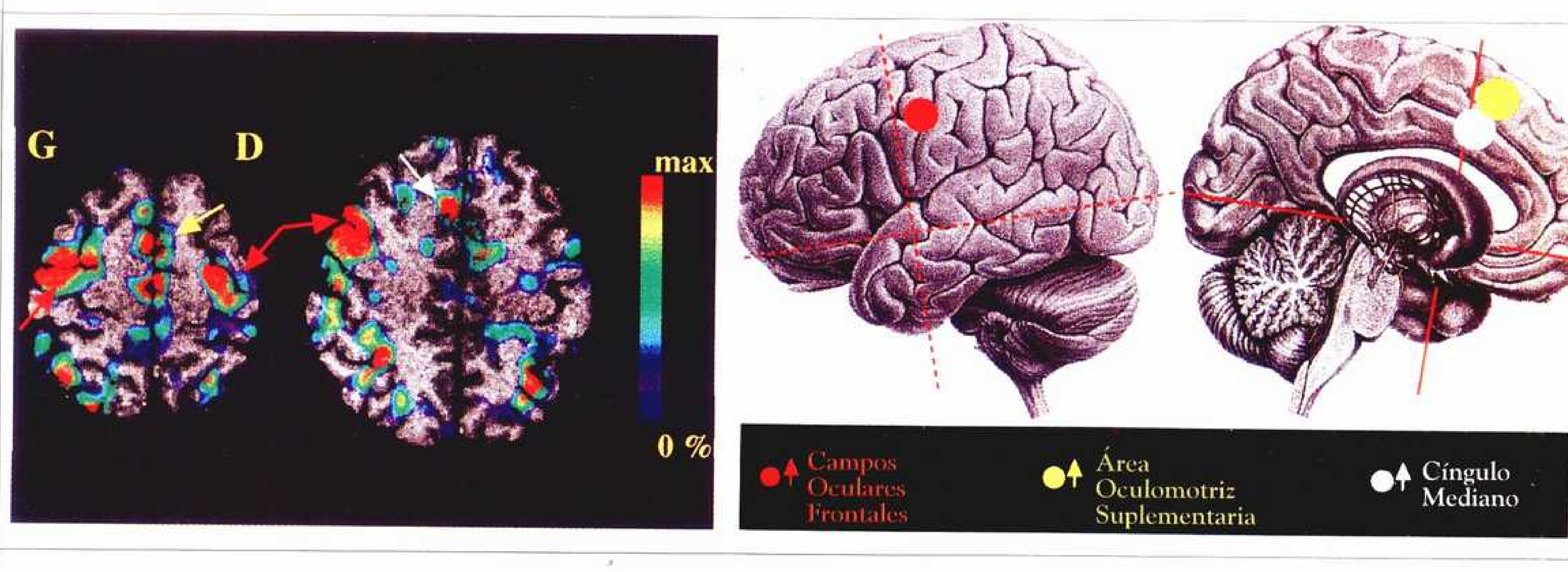
La actividad de las neuronas de la AMS en el simio precede a movimientos complejos. Está relacionada con una acción global, puesto que estas neuronas contribuyen a activar músculos de la mano izquierda, pero solamente cuando el movimiento se hace con ambas

**REFLEJO VESTÍBULO-OCULAR**
Reflejo que une receptores vestibulares a los músculos de los ojos permitiendo la estabilización visual durante los movimientos de la cabeza.

**CÓRTEX PIRIFORME**
En el paleocórtex de los mamíferos, formación en forma de pera que constituye una parada de las vías olfativas.

**CÓRTEX INSULAR**
o lóbulo central. Área situada en la parte media del surco lateral (comisura de Silvio).

**CÓRTEX CINGULAR**
o córtex límbico, gyrus cingular. Cubre el cuerpo calloso.




Las actividades registradas por la cámara de emisión de positrones, que integra en 80 segundos, no permiten distinguir estos dos tipos de señales. Segunda limitación importante: estas técnicas tampoco permiten distinguir entre la actividad de neuronas inhibidoras. Ahora bien, acabamos de ver que existen varias vías con movimiento sacádico de mecanismos inhibidores. No hay que olvidar estas limitaciones al analizar los datos de la imaginería.

Los movimientos sacádicos están organizados con la cooperación de muchas áreas corticales, de las cuales solamente algunas han sido bien estudiadas. Será conveniente recordar sus propiedades esenciales para ilustrar el trabajo que se hace en imaginería cerebral.

Una zona esencial del córtex para la producción de movimiento sacádico voluntarios es el área llamada *campo oculomotor frontal* (fig. 3), cuya estimulación eléctrica produce los movimientos de los ojos. El campo oculomotor frontal en el simio contiene varias categorías de neuronas que descargan según los tirones, la fijación ocular, la

nes oculares voluntarios. Siempre se ha sugerido, en base a lesiones en el hombre, que podría haber una disociación entre la zona rostral (anterior) de esta área cortical, que intervendría en la organización de movimientos complejos o finos (y que, por tanto, tendría una función de tipo *frontal*), y la zona caudal (posterior) que sería puramente motriz. Únicamente ciertas técnicas de imaginería más finas permitirán dilucidar esta cuestión.

Otra zona esencial: el área motriz suplementaria (AMS). En el hombre, está situada en la parte media del lóbulo frontal, delante de las áreas motrices propiamente dichas. Su localización ha sido estudiada mediante registro de la actividad eléctrica (EEG) y magnética (MEG)(17) y en numerosos estudios que utilizan la TEP(18) y la IRM (fig. 3). Hay que recordar que la AMS forma parte de bucles que unen estructuras de los núcleos grises centrales (ganglios basales) y el tálamo. Por consiguiente, su función está ligada a la de los otros núcleos y también a la de otras estructuras, como el cerebelo. Funciona también

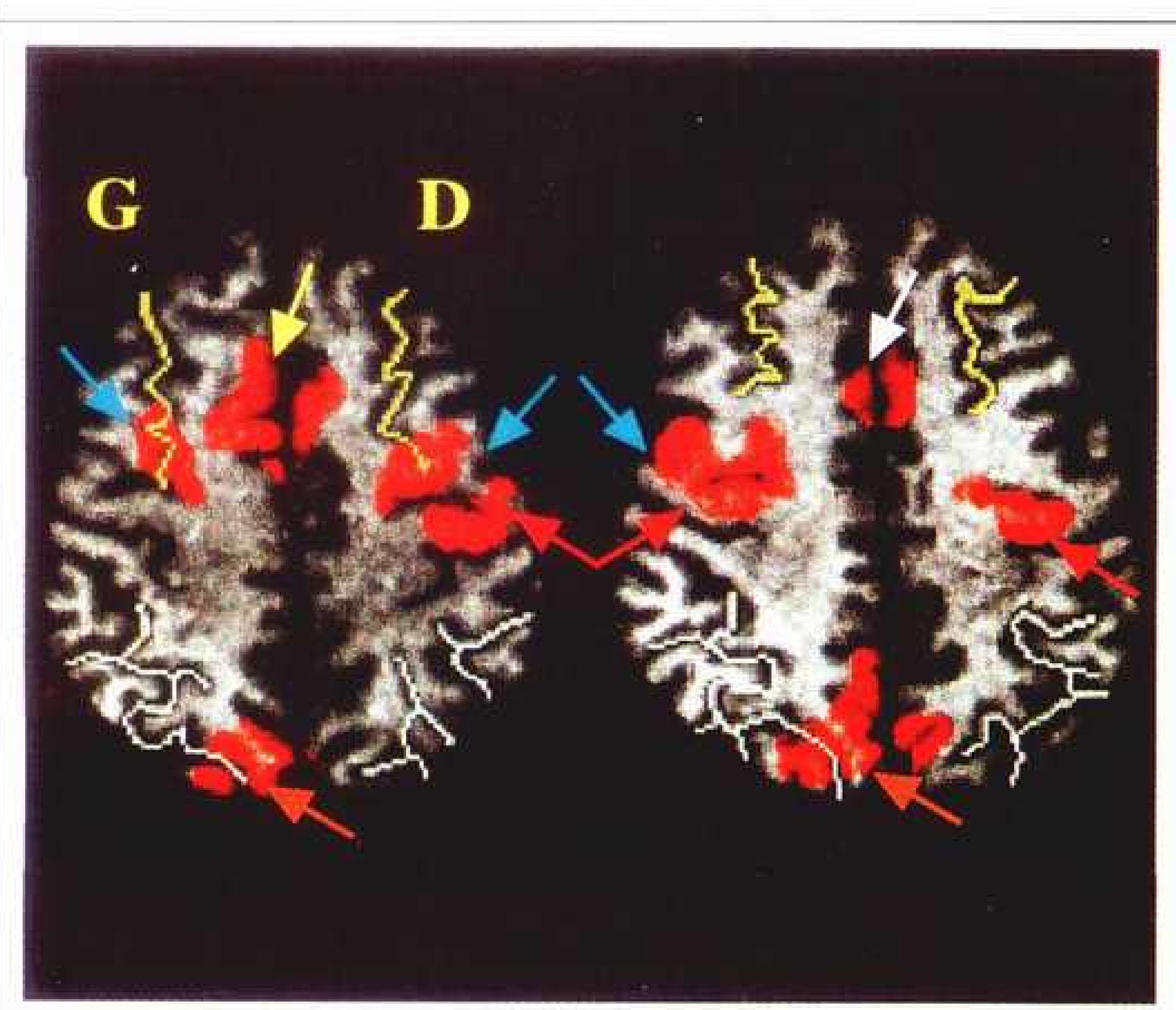
***Figura 4.***
***Fijación de un punto central imaginado.***
*Los sujetos han de fijar la mirada en un objetivo central durante 30 segundos. Una vez desaparecido el objetivo, las variaciones de flujo sanguíneo cerebral se midieron en TEP, mientras que los sujetos debían continuar fijando la mirada en dirección al objetivo. Este estudio demostró que en el hombre las estructuras oculomotrices corticales responsables de la producción de movimientos sacádicos simples controlan también la supresión activa de este movimiento, es decir, la fijación ocular. A la izquierda: mapas de activación individual obtenidos de los cortes anatómicos correspondientes. Estos mapas representan la diferencia entre los de flujo sanguíneo cerebral (FSC) obtenidos en la tarea oculomotriz estudiada y los obtenidos en una condición de referencia. La escala de color indica la intensidad de la activación en porcentaje de aumento del FSC. A la derecha: recapitulación de las regiones corticales que intervienen en la fijación de un punto central imaginado. El eje horizontal, en rojo, corresponde al plano bicomisural, y el vertical, al plano ortogonal que pasa por la comisura anterior.*

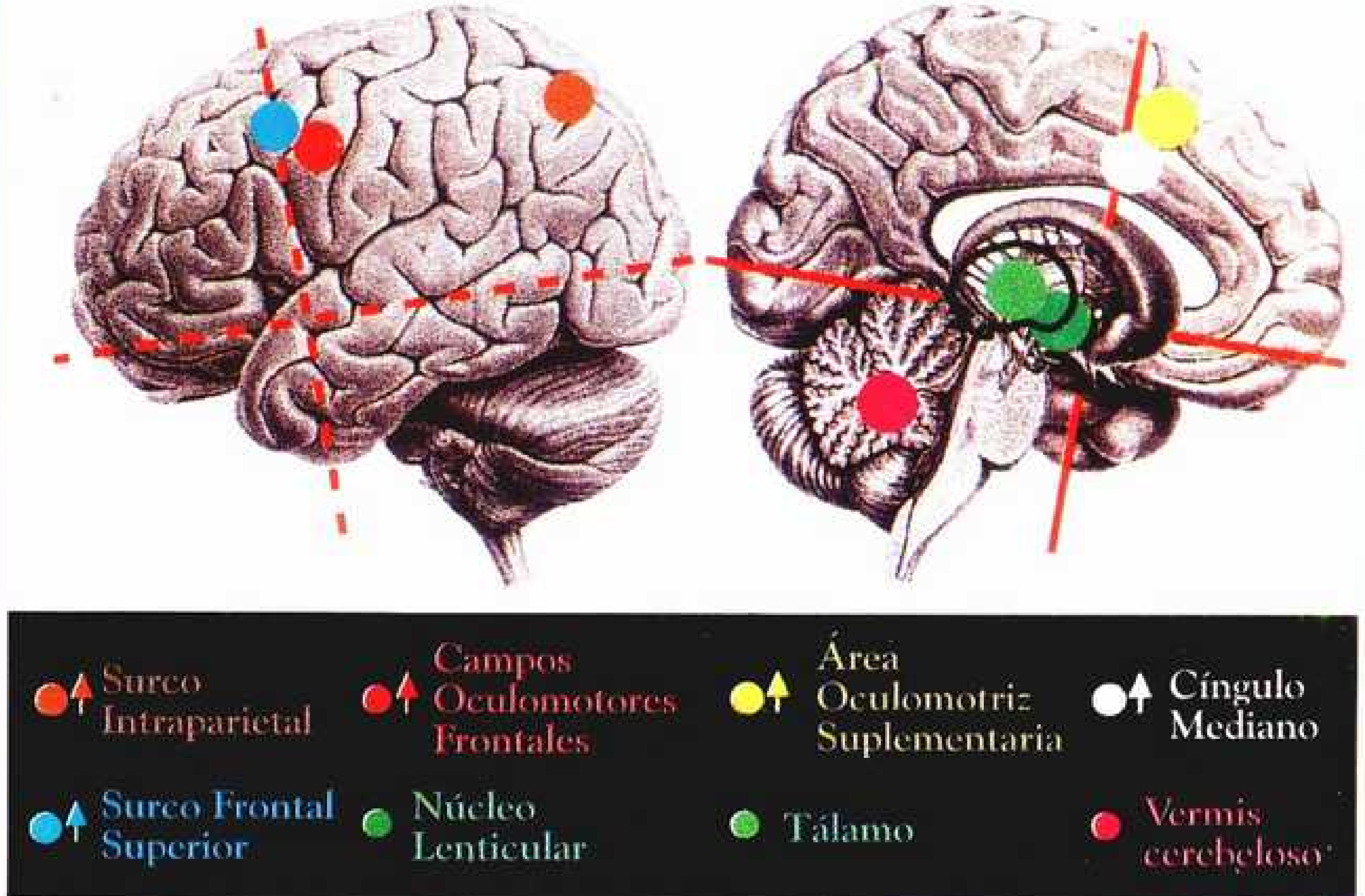
**(12)**
E. Melamed *et al.*, *Ann Neur.*, 5, 79, 1989.
**(13)**
L. Petit *et al.*, *J. Neurophysiol.* 69, 1.009, 1993.
**(14)**
L. Petit *et al.*, *Eur. J. of Neuroscience*, 7, 169, 1995.
**(15)**
A. Berthoz *et al.*, *Soc. neurosci. Abstr.* 18, 1992.
**(16)**
L. Petit *et al.*, *Eur. J. of Neuroscience*, en prensa, 1996.
**(17)**
W. Lang *et al.* *Exp. Brain Res.*, 87, 688, 1991.
**(18)**
M.P. Deiber *et al.*, *Exp. Brain Res.*, 84, 393, 1991.

manos. Interviene también cuando un animal ha de hacer o no un movimiento (una tarea llamada GO-NO-GO por los anglosajones). Y, finalmente, interviene en secuencias de movimiento.

La ablación de la AMS en el simio provoca, sobre todo, deficiencias en tareas de prensión, mientras que las otras funciones motrices permanecen intactas.

en los movimientos endógenos, mientras que el córtex premotor contribuye a los movimientos guiados por señales sensoriales. Esta distinción podría ser profunda y remontarse hasta muy lejos en la evolución. En el árbol de los mamíferos, la AMS tiene su origen en el hipocampo y una raíz límbica en el córtex cingular anterior. A su vez, el córtex premotor tendría su origen en el córtex




En el hombre, una lesión de la AMS induce a cinesia global, deficiencias en los movimientos alternos de las extremidades, mutismo, desórdenes del habla, de la secuenciación de los gestos, de la coordinación bimanual, de los movimientos memorizados y, sobre todo, de los movimientos producidos de manera endógena, es decir, construidos libremente por el cerebro, incluso en ausencia de estímulo externo.

**Gracias a la imaginería, hemos podido demostrar que las áreas parietales sólo se activan con la ejecución de movimientos sacádicos en los que interviene la memoria**

Datos confirmados por los registros, en el hombre, de la actividad eléctrica en la superficie craneal (EEG). En la zona del córtex que corresponde a la AMS se registra un potencial eléctrico lento que precede aproximadamente un segundo y medio a un simple gesto del dedo: es lo que se llama el potencial de preparación. La AMS queda fuertemente activada cuando se pide al sujeto que efectúe una tarea de golpeteo bimanual con un ritmo diferente en cada mano, como en el caso de la ejecución de una partitura de piano.[19, 20] Para movimientos más sencillos, la AMS es poco solicitada, pues en tales casos es, sobre todo, el córtex motor el que se activa. Se piensa que la AMS participa esencialmente

piriforme* y su raíz en el córtex insular.* Las entradas subcorticales de la AMS vienen, esencialmente, a través del tálamo, de los ganglios basales, mientras que el córtex premotor recibe sus entradas del cerebelo. La AMS recibe entradas córtico-corticales somatosensoriales del córtex parietal, y entradas límbicas del córtex cingular, mientras que el córtex premotor recibe, sobre todo, entradas córtico-corticales del córtex parietal.

Pero se piensa que en el interior de la AMS pueden distinguirse dos zonas: delante, la zona llamada pre-AMS tiene conexiones con el córtex prefrontal y recibe entradas del área llamada 46 (córtex premotor anterior) y también del cíngulo* anterior, que interviene en la intención de movimiento y la atención. Sólo la AMS propiamente dicha tiene conexiones con el córtex motor y el cíngulo posterior, cuya función es más bien motriz. La estimulación eléctrica o magnética de la pre-AMS daría una *intención de movimiento* (los sujetos dicen: «Tengo ganas de hacer un movimiento»). Datos recientes con la TEP sugieren que la pre-AMS se activa con el movimiento imaginado de los dedos y la AMS propiamente dicha, con el movimiento ejecutado.

Parece existir otra subdivisión de la AMS para los movimientos de la mirada. Si se estimula esta subzona con movimientos de los ojos, se observan movimiento sacádico que, en vez de tener una dirección fija, convergen hacia un punto.[21] En el simio, esta área se ha denominado *campo oculomotor suplementario* (COS). Pacientes portadores de lesiones de la AMS izquierda presentan deficiencias en la ejecución de secuencias de dos o tres movimientos sacádicos hacia objetivos visuales memorizados.[21,22] Por lo tanto, esta región es, indudablemente, esencial para la organización del proceso de tirones frente a una escena visual. También demostramos, en colaboración con Charles Pierrot-Deseilligny y

**Figura 5. Repetición de secuencias memorizadas de movimiento sacádico.** *Primero, los sujetos debían memorizar las posiciones sucesivas de un objetivo visual, realizando una secuencia de seis tirones horizontales. Una vez en la oscuridad, las variaciones de FSC se median en TEP, mientras que los sujetos tenían que repetir esta secuencia memorizada de tirones. Además de la intervención de la red de regiones responsables de la ejecución de los tirones que formaban las secuencias a realizar (véase fig. 3), este estudio confirmó la clara intervención del córtex parietal, especialmente a la altura del surco intraparietal (color naranja), cuando se necesitaba una codificación espacial de los tirones. El trabajo también ha descrito la participación de una región situada en la profundidad del surco frontal superior (en azul) en la repetición de una secuencia memorizada de movimiento sacádico. Todo esto revela la intervención de una memoria de trabajo a nivel del córtex premotor, que permite el mantenimiento de una representación interna de las informaciones espaciales en la secuencia de tirones a reproducir. A la izquierda: mapas de activación individual obtenidos a dos niveles de corte para mostrar la diferencia entre los mapas de FSC obtenidos en la tarea oculomotriz estudiada y los obtenidos en una condición de referencia, superpuestos luego a los cortes anatómicos correspondientes. A la derecha: recapitulación de las regiones corticales y subcorticales que intervienen en la repetición de secuencias memorizadas de movimiento sacádico horizontales. El eje horizontal, en rojo, corresponde al plano bicomisural, y el vertical, al plano ortogonal que pasa por la comisura anterior.*

(19)
W. Lang *et al.*, Exp. Brain Res., 79, 504, 1990.
(20)
J. Schlag *et al.*, Jal Neurophysiology, 57, 179, 1987.
(21)
B. Gaymard *et al.*, Ann. Neurol., 28, 622, 1990.
(22)
B. Gaymard *et al.*, Ann. Neurol., 34, 404, 1993.

sus colaboradores, que interviene en los movimientos sacádicos memorizados de origen vestibular.

La imaginería cerebral confirma que la AMS, o más bien el COS, se activa durante varias clases de movimientos oculares: tirones simples voluntarios en la oscuridad y secuencias memorizadas en todas las tareas de movimientos sacádicos endógenos (figs. 3, 5, 6) que hemos analizado, lo que parece confirmar el papel de esta estructura en la producción de movimientos endógenos o *voluntarios*.

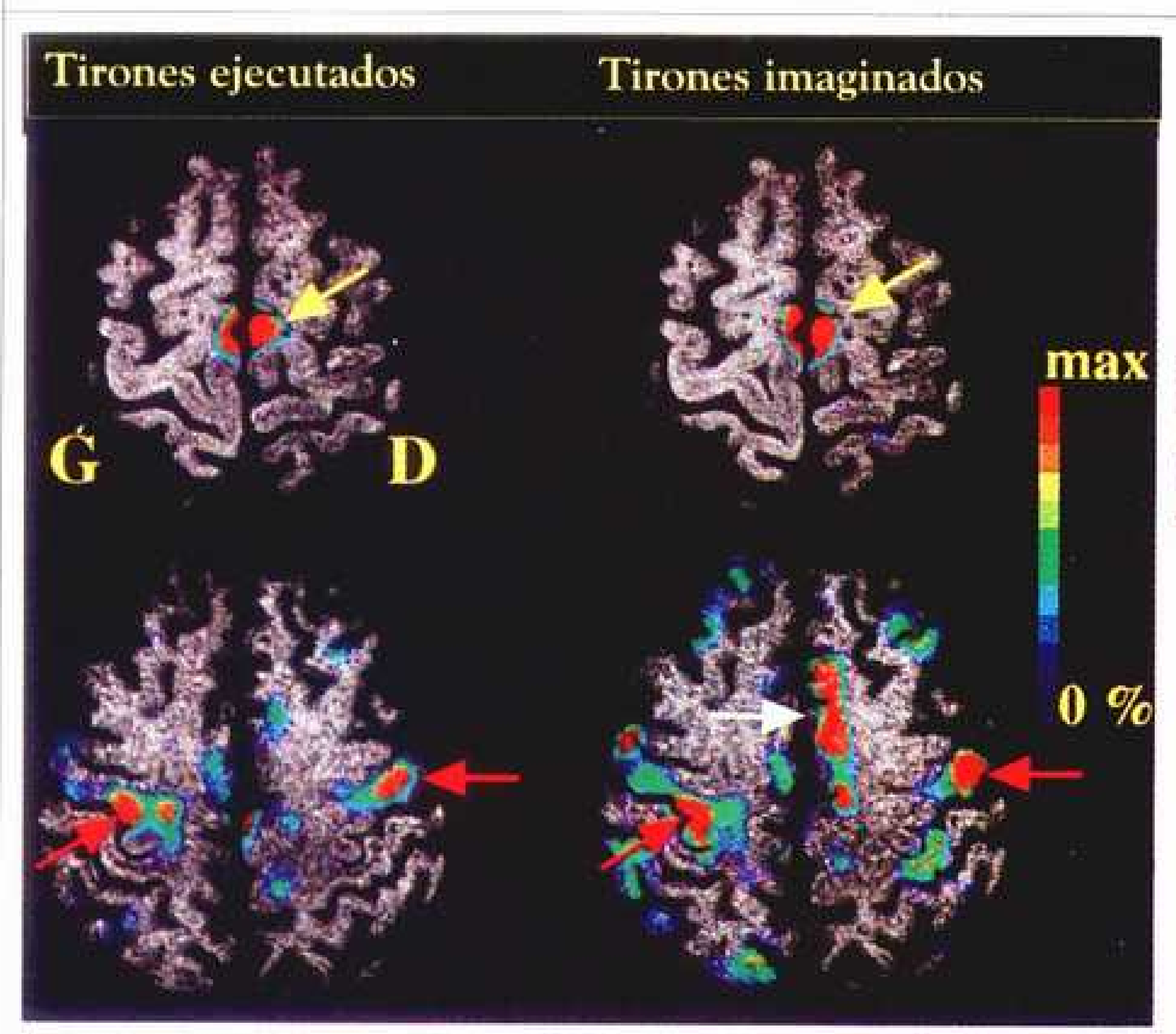
Gracias a la imaginería cerebral, hemos podido demostrar, por primera vez, que las áreas parietales solamente son activas durante la ejecución de tareas en secuencias de movimientos sacádicos memorizados.[24] Recordemos que lesiones parietales derechas inducen grandes enfermedades neurológicas, como la negligencia espacial, que hace que el paciente no tenga en cuenta la mitad del espacio situado ante él, espacio que, por otra parte, ve perfectamente. Tales lesiones provocan también errores de localización. Por ejemplo, el enfermo ve muy bien el vaso que hay sobre la mesa y la botella que tiene en la mano, pero no puede verter el agua de la botella en el vaso. La vierte al lado, ya que no puede integrar en una representación coherente la posición de su mano y el espacio exterior.

Por esto, se ha atribuido al córtex parietal un papel esencial en la formación del *esquema corporal*, aunque todavía se duda entre teorías que le asignan un papel fundamental en la dirección de la atención visual, y otras según las cuales dirigiría la planificación de los movimientos. En el simio, las neuronas del área visual intraparietal lateral (IPL) que responden a estímulos visuales tienen una respuesta cuya intensidad depende de la dirección de la mirada del animal. Así pues, una señal de medida de la posición del ojo en la órbita, procedente de las profundidades del cerebro, es decir, del integrador neuronal del tronco cerebral, viene a añadirse a la actividad de las neuronas inducida por la visión. Además, se ha descubierto otra zona en la parte lateral del surco intraparietal especializado en la producción de movimiento sacádico.

Diversos trabajos recientes han demostrado que en estas áreas del córtex parietal se originan convergencias multimodales visuales, vestibulares (oído interno) y propioceptivas (sensibilidad muscular, ligamentos, etc.). Ciertos autores piensan que en el córtex parietal se produce un cambio de coordenadas que de tirones, lo cual viene a recuperar la idea de la implicación de esta área en la organización de movimientos que exigen una limitación temporal.

La imaginería cerebral ha confirmado también la intervención de la parte anterior del córtex cingular en los procesos de atención y de decisión perceptiva, solamente sospechados hasta hace poco, sobre todo a causa de sus relaciones con el córtex prefrontal. El estudio neurofisiológico de esta estructura había sido descuidado por los investigadores que registran neuronas. Su patología es muy difícil de interpretar debido a la dificultad de hallar pacientes con lesiones específicas en esta zona. Respecto a la parte mediana del córtex cingular, los registros de neuronas han sugerido una aportación, todavía poco comprendida, en la organización del movimiento de las manos, de los ojos y de la cabeza. Algunos investigadores han demostrado en el simio la existencia de neuronas que descargan durante la planificación y la ejecución de los movimientos simples y complejos del brazo. La parte posterior del *gyrus* cingular parece afectada no por la selección perceptiva o la planificación del movimiento, sino, quizá, por la reorganización perceptiva después de un movimiento o, incluso, el control correctivo. Las neuronas del córtex cingular posterior descargan *después* de los movimientos sacádicos, y su actividad depende de las características del tirón precedente.[23] Esta región podría, por tanto, desempeñar un papel en la integración de las consecuencias de la acción.

Por nuestra parte, hemos hallado una activación del córtex cingular mediano



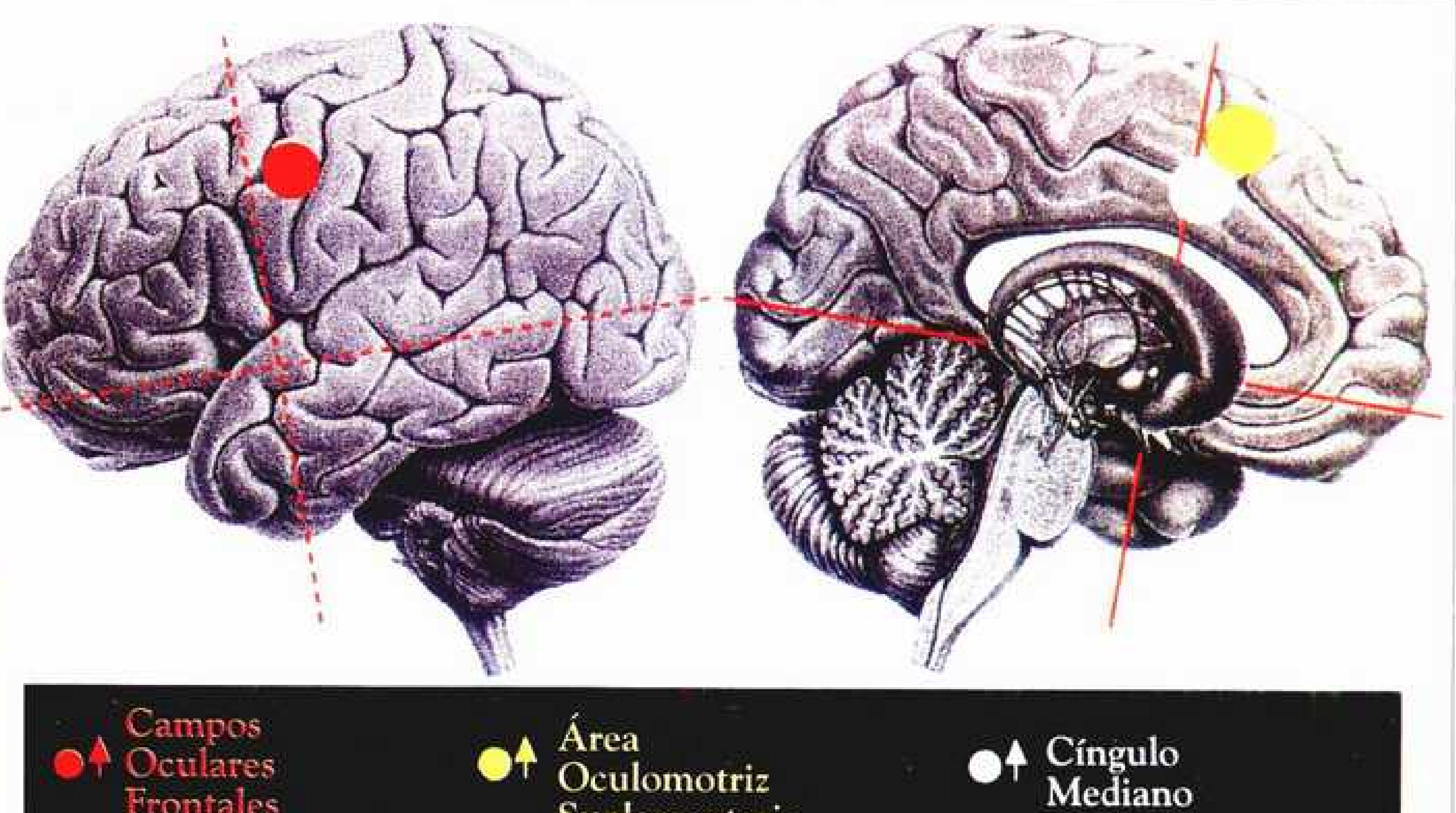




**Figura 6. Imaginación de movimientos sacádicos horizontales voluntarios.** *La duración de la obtención de las imágenes de TEP (80 segundos) no permite distinguir entre los dos componentes principales de la producción de un tirón horizontal voluntario, es decir, la preparación y la ejecución de este movimiento. Este estudio utilizó un protocolo destinado a observar las estructuras cerebrales que intervienen específicamente tan sólo en la preparación de tirones horizontales voluntarios. Para ello, los sujetos debían imaginar que ejecutaban tirones horizontales de amplitud y de frecuencia máximas, pero sin mover los ojos. En términos de variación del FSC, el estudio de un movimiento de tirón imaginado demostró la intervención de las mismas regiones corticales anteriormente descritas en la realización efectiva de los tirones (fig. 3). Estos resultados han sido los primeros en demostrar, en TEP y en el hombre sano, que el movimiento imaginado puede ser efectuado por la misma red de estructuras que se pone en funcionamiento en la ejecución real. A la izquierda, mapas de activación individual obtenidos a diferentes niveles de corte y superpuestos a los cortes anatómicos correspondientes. Columna de la izquierda: mapas de activación individual tomados en la ejecución efectiva de tirones horizontales; columna de la derecha: los obtenidos en la imaginación de tirones horizontales. La escala de color indica la intensidad de la activación en porcentaje de aumento del flujo sanguíneo cerebral. A la derecha: recapitulación de las regiones corticales y subcorticales que intervienen en la imaginación de tirones horizontales voluntarios. El eje horizontal, en rojo, corresponde al plano bicomisural, y el vertical, al plano ortogonal que pasa por la comisura anterior.*

**(23)** S.Y. Musil *et al.*, *Soc Neurosci. Abstr.*, 16, 1.221, 1990.
**(24)** L. Petit *et al.*, *Human Brain Mapping, Supp.* 1, 413(Abstract), 1995.

reconstruye la posición del objetivo en el espacio, integrando las posiciones respectivas del objetivo mismo, el ojo, la cabeza, el cuerpo, etc. Pero nosotros no estamos de acuerdo con este concepto cartesiano del cerebro. Conforme a la teoría que propusimos junto con Jacques Droulez,[25] otros autores proponen la idea de que la localización del objetivo está codificada en el córtex parietal en coordenadas oculocéntricas, que serían reactualizadas permanentemente en función de los movimientos del ojo, e incluso de su posición anticipada.[26,27]

Se constata, por ejemplo, que cuando se ilumina muy brevemente un objetivo, una neurona del área IPL a cuyo campo receptor llega la información, responde al rastro memorizado del objetivo aunque éste haya desaparecido. Además, cuando se produce un movimiento del ojo, aproximadamente la tercera parte de las neuronas de la IPL desplazan su campo receptor. Se trata, en este caso, de una anticipación del movimiento, que permite a la neurona responder incluso antes de que el objetivo llegue al campo receptor.

Por tanto, la ausencia (en TEP) de toda actividad del córtex parietal durante los movimiento sacádico voluntarios en la oscuridad (fig. 3) no es sorprendente, ya que esta estructura interviene principalmente en tratamientos espacio-visuales a partir de informaciones visuales previamente percibidas. Esto habría que compararlo con la activación del córtex parietal durante movimientos sacádicos memorizados, ya que cuando esta zona está lesionada en el hombre, se observa una degradación de la precisión y un aumento de latencia de los tirones visualmente guiados o memorizados. Los datos recientes de la imaginería cerebral muestran que, en el hombre, es el lóbulo parietal superior el que está activado durante tareas de movimientos de los ojos o del brazo visualmente guiados, de rotación mental de la mano, de localización espacial e incluso de ejercicios de imaginería mental, como la exploración de una isla.

Hemos observado que la ejecución de secuencias de movimiento sacádico memorizados induce a la activación bilateral del córtex frontal dorso-lateral superior. Situada delante del *gyrus* precentral, la región así definida corresponde a una parte del córtex premotor.

Después de la ablación del córtex premotor, un simio no puede recordar un movimiento de brazo aprendido a base de informaciones visuales, pero sí es capaz de aprender una tarea no motriz en la cual las mismas informaciones visuales especifican el objeto a elegir. Se han hallado, en TEP, activaciones del córtex premotor en la ejecución de movimientos de los dedos y de las manos, simples y complejos, y más especialmente en la reproducción de una secuencia aprendida de movimientos del dedo, observaciones que han sido corroboradas en pacientes portadores de lesiones del córtex premotor. Estos pacientes no presentan deficiencias en la selección de acciones motrices apropiadas en su vida cotidiana, pero tienen serias dificultades cuando sus movimientos están dirigidos por un estímulo arbitrario. También es posible que esta área, como la AMS, intervenga en la coordinación temporal del movimiento de los movimientos sacádicos. En la actualidad, estas observaciones apoyan la idea de la intervención del córtex premotor en la relación entre el movimiento que se está ejecutando y los datos de la memoria.

**Según nuestra hipótesis, tanto en los movimientos imaginados como en los movimientos ejecutados deberían utilizarse las mismas estructuras neuronales**

En ninguno de los paradigmas que hemos empleado hasta ahora hemos hallado activación del córtex prefrontal. Sin embargo, los datos neurofisiológicos demuestran que, en el simio, las neuronas de esta área intervienen en la organización de los movimientos sacádicos con demora, lo cual concuerda con las hipótesis sobre la importancia del córtex prefrontal en la memoria representacional y los procesos atencionales durante los movimientos de la mirada.

Por otra parte, se sabe que en el hombre los pacientes con lesiones frontales y prefrontales tienen deficiencias en su capacidad de bloquear los movimientos sacádicos. En estos pacientes, se observan deficiencias en las tareas llamadas antitirón, que consisten en producir un tirón en sentido contrario a la dirección del objetivo que se ilumina. De este modo, se han descubierto en el simio y en el hombre unas regiones prefrontales que intervienen en la orden de no hacer un movimiento (NO-GO). Por tanto, es cierto que, a este nivel, existe un mecanismo importante de selección y de control de la orientación de la mirada, probablemente comprobable en imaginería.

En efecto, es posible bloquear la ejecución a diferentes niveles sin suprimir el funcionamiento de los bucles internos donde pueden elaborarse y simularse los movimientos de la mirada. Recientemente, otros autores han aportado datos sobre este particular, bien por comparación de los tiempos de ejecución, bien por imaginería cerebral.[28-31] Para ensayar esta hipótesis, nosotros, junto con el grupo de Orsay al que se integraron W. Lang y P. Holliger, de la Universidad de Viena, llevamos a cabo un experimento en el cual comparamos las áreas corticales activadas en los movimientos sacádicos ejecutados y en los imaginados.[32] Medimos los movimientos oculares con el fin de controlar perfectamente que los tirones seguían siendo de amplitudes insignificantes durante las tareas de movimiento imaginado (fig. 6). El sujeto debía fijar un punto luminoso situado ante él y hacer, primero, unos tirones horizontales voluntarios. Luego, debía fijar el objetivo en la oscuridad y hacer tirones imaginados parecidos a los precedentes. Este trabajo nos llevó a la conclusión de que el campo oculomotor, la AMS y el córtex cingular se activaban con los movimientos imaginados lo mismo que lo habían hecho con los movimiento sacádico ejecutados.

Tendremos que relacionar estas observaciones con el problema más general de los desplazamientos de la atención. En un trabajo reciente, algunos investigadores pidieron a los sujetos que desplazaran su atención hacia partes diferentes del campo visual sin hacer ningún movimiento con los ojos. Compararon las activaciones en esta primera tarea con las que fueron inducidas por una tarea de fijación central destinada a impedir cualquier desplazamiento de la atención visual y observaron una activación del lóbulo parietal superior. También necesitaremos precisar las relaciones entre los datos obtenidos hasta el momento sobre el control de la dirección de la mirada y el circuito fronto-parieto-cingular, que intervendría en la atención dirigida.[33]

Evidentemente, los movimientos de la mirada constituyen un excelente modelo fisiológico para el estudio de las bases neurales de la decisión y de la imaginación motriz. Solamente los registros de neuronas en el simio permitirán realmente conocer los mecanismos biológicos que subyacen en los aspectos más complejos de esta función altamente cognitiva. Pero no es menos evidente que la imaginería cerebral se ha convertido en un instrumento fundamental e inevitable para comprender los misterios y la patología de esta función en el hombre.

**A.B. y L.P.** ■


***Para más información***

■ L.G. Ungerleider, M. Mishkin, *Analysis of visual behaior*, D.G. Ingle, M.A. Goodale, R.J.Q. Mansfield (eds.), MIT Press, 549, 1982.

■ N.I. Seeno *et al*, *Science*, 268, 889, 1995.

**(25)** J. Droulez *et al.*, *Proc. Nat. Acad. Sci.* USA, 88, 9.653, 1991.

**(26)** C.L. Colby *et al.*, *Cereb. Cortex*, 5, 470, 1995.

**(27)** J.-R. Duhamel *et al.*, *Science*, 255, 90, 1992.

**(28)** J. Decety *et al.* BBR, 72, 127, 1995.

**(29)** J. Decety *et al.*, *Brain and Cognition*, 11, 87, 1989.

**(30)** J. Decety *et al.*, *Nature*, 371, 600, 1994.

**(31)** E. Ryding *et al.*, *Cognit. Barin Res.*, 1, 94, 1993.

**(32)** W. Lang *et al.*, *Neuroreport*, 5, 921, 1994.

**(33)** M.M. Mesulam, *Ann. Neurol.*, 10, 309, 1981.

# AMABLE LIÑÁN: INVESTIGADOR DE LA COMBUSTIÓN

## Hay que fomentar la relación universidad-empresa

**El estudio de los procesos de combustión exige dedicación y paciencia. Los avances aquí nunca son espectaculares. Solamente aquéllos con verdadera vocación no se desaniman. Y éste es el caso del ingeniero Amable Liñán, catedrático de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos. Desde que se inició en 1958 como becario del Grupo de Combustión del INTA, Liñán ha preservado en sus investigaciones sobre esta materia. Hoy es una figura acreditada internacionalmente que imparte cursos en lugares de excelencia y colabora en proyectos punteros de investigación. A partir de 1992 ha recibido una verdadera catarata de premios y honores que él agradece y que no le han afectado en su labor ni en su carácter accesible a todos.**



***MUNDO CIENTÍFICO: La materia de la que usted es catedrático se considera una asignatura extraordinariamente compleja, aunque quizá sea por puro desconocimiento respecto a su contenido. ¿En qué consiste exactamente la Mecánica de Fluidos?***

AMABLE LIÑÁN: La mecánica de fluidos se ocupa de la descripción del movimiento de líquidos y gases. Para la aeronáutica tienen interés los movimientos de líquidos como los lubricantes, la gasolina y el queroseno; por ejemplo, cómo se lleva el queroseno del depósito a la bomba de inyección y qué procesos intervienen en la atomización del líquido en la cámara de combustión. La fluidodinámica es básica en el estudio de los sistemas de propulsión de los aviones, pero la dinámica de vuelo, que depende de las fuerzas de sustentación y resistencia que ejerce el aire sobre el avión.

***M.C.: Además de su aplicación en un campo como la ingeniería aeronáutica existen otros campos en los que aplicar el conocimiento de este tipo de investigación.***

A.L.: La mecánica de fluidos no sólo se necesita en la ingeniería aeronáutica, también es importante en meteorología, en acústica, oceanografía, circulación de la sangre o en los procesos respiratorios. Interviene en una variedad enorme de fenómenos por lo que su conocimiento resulta imprescindible para las ciencias en general.

***M.C.: Sus investigaciones sobre la combustión le sirvieron para conseguir una distinción tan prestigiosa como el premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica. ¿A qué se debe su especialización a la que, por otra parte, ha dedicado toda su vida?***

A.L.: No he hecho más que seguir a la humanidad en su preocupación por la Combustión. Es un conocimiento muy antiguo que en la combustión se genera calor y luz. La humanidad ha utilizado estos fenómenos desde hace medio millón de años para calentarse, en la transformación de los alimentos y para la iluminación. Pero ya en la Edad Media en las armas de fuego y desde el siglo XVIII, en las máquinas de vapor, se está utilizando el calor de la combustión en otra forma; al aprovechar la expansión de los gases, que se origina como consecuencia del calentamiento, en producir trabajo mecánico. Es decir, a la combustión va asociado el calentamiento de los gases, lo que provoca sobrepresiones y éstas se pueden aprovechar para desplazar órganos móviles como los álabes de la turbina o el pistón de un motor alternativo, de modo que la energía térmica liberada en el proceso se convierte en energía mecánica con múltiples usos.

Antes de Lavoisier la combustión o, con otra palabra, el fuego, era uno de los elementos de la naturaleza junto con el aire, el agua y la tierra. Lavoisier, del que se conmemoró hace un par de años el bicentenario de su muerte en la guillotina, demostró que la combustión era la combinación del oxígeno del aire con las sustancias combustibles. Ahora bien hoy, partiendo del conocimiento científico que nos aportó Lavoisier, sabemos, que en la combustión intervienen además una gran variedad de fenómenos físicos complejos. En la combustión el comburente, típicamente el oxígeno del aire, reacciona con el combustible principalmente en fase

gaseosa. El combustible puede estar originalmente en forma sólida, como el carbón, en forma líquida, como los hidrocarburos líquidos (la gasolina y el queroseno, por ejemplo) o en forma gaseosa; hay que purificar el carbón, y vaporizar los combustibles líquidos como parte del proceso de combustión. Sólo así los gases combustibles generados, después de mezclarse con el oxígeno del aire, podrán reaccionar con el mismo para generar el calor y los productos de combustión.

***M.C.: Una de sus aplicaciones industriales más conocida es la de los motores de combustión, cuya existencia se ha sometido en reiteradas ocasiones a debate. ¿Es realmente tan discutible su futuro?***

**A.L.:** Obviamente, su futuro está condicionado a la existencia de combustibles líquidos, que estamos agotando y que habrá que producir en el futuro, a partir del carbón. Pero, como señalé antes, también tienen su pasado, que se inicia hace un siglo con los motores de Otto y Diesel. Previamente se había aprovechado la expansión de los gases de combustión en las armas de fuego, transformando la energía térmica en energía cinética. En las armas de fuego los gases presionan sobre la bala y le comunican una energía cinética; esto es, transformando así la energía térmica en mecánica. Pero en los motores el proceso se hace, no de un modo singular sino, de forma periódica, repetitiva y controlada. En la máquina de vapor, inventada a finales del siglo XVIII; la combustión tiene lugar en la caldera, y el calor se utiliza, fuera de la misma, para generar y calentar el vapor, que al expansionarse produce la energía mecánica. Ya en este siglo, se han desarrollado las turbinas de gas, los motores de reacción y los motores cohete.

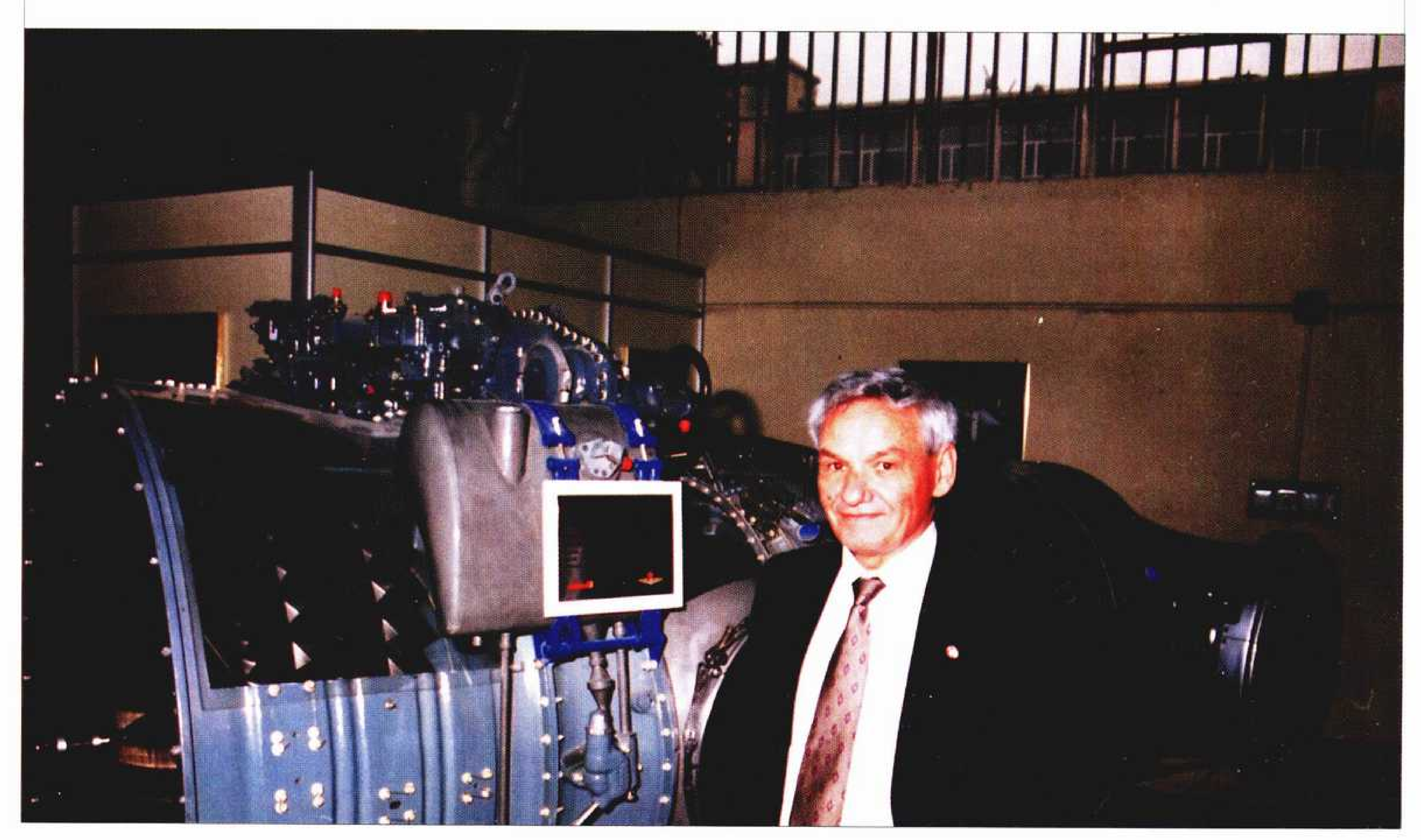
***M.C.: Sin embargo, y a pesar de lo que se ha investigado, parece que el rendimiento de los motores de combustión sigue siendo muy bajo.***

**A.L.:** La ventaja que ofrecen los combustibles líquidos, como fuente de energía para la propulsión de automóviles y aviones, estriba en su estabilidad, facilidad de transporte y uso, con potencias de escalas muy diversas, en los motores de peso reducido que se basan en la combustión. Es dudoso que para la propulsión aparezca otro tipo de motores que no utilicen la combustión, excepto para algunas aplicaciones en la propulsión espacial, como es el caso de los motores iónicos, en los que la propulsión se genera acelerando iones mediante campos eléctricos. También están en desarrollo las pilas de combustibles para la generación directa de energía eléctrica. De todas formas, los motores de combustión van perfeccionándose con el tiempo y con ello va aumentando su rendimiento. El aspecto negativo de los sistemas de propulsión basados en la combustión es que sólo una fracción relativamente pequeña de la energía química que contienen los combustibles, y que se libera en la reacción con el oxígeno del aire, se aprovecha como energía mecánica, y el resto se pierde en calentar la atmósfera. En las primeras máquinas de vapor el rendimiento era del orden del 2 %. Hoy en los automóviles la energía aprovechada es de un 25 %, un poco más elevada en los motores diesel. En los de turbina que se utilizan en aviación el rendimiento puede llegar al 40 %, aunque se quiere alcanzar el 50 %. Siempre que se consigue mejorar el rendimiento de la combustión, por poco que sea, representa un avance enorme pues se traduce en ventajas finales de ahorro de combustible y de menor producción de sustancias contaminantes. Pero la tarea es muy difícil. La mejora del rendimiento está ligado a que la combustión se realice a presiones y temperaturas muy altas con respecto a los valores ambientales. De este modo se aprovecha mejor la energía liberada en la expansión de los gases, pero esto conlleva el aumento en la producción de ciertas sustancias contaminantes, como los óxidos de nitrógeno.

## Algunas partículas e hidrocarburos no quemados producidos en la combustión son sustancias cancerígenas

***M.C.: A pesar de que las mejoras a que usted se refería implican un descenso de las sustancias contaminantes, éstas no dejan de ser una preocupación constante en una sociedad cada vez más concienciada de la necesidad de cuidar nuestro medio natural.***

**A.L.:** Los principales productos de la combustión son el dióxido de carbono y el vapor de agua. Las sustancias contaminantes se emiten en proporciones mil



veces menores. Éstas incluyen hidrocarburados sin quemar, como el metano, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre y de nitrógeno dan lugar a la lluvia ácida. Por otra parte, los óxidos de nitrógeno intervienen, además, como catalizador, en la eliminación del ozono en la alta atmósfera. El ozono es esencial para la absorción de radiaciones ultravioletas procedentes del sol, y que son dañinas para los seres vivos. Los óxidos de nitrógeno son consecuencia de la reacción del nitrógeno con el oxígeno atómico que se produce como radical intermedio durante la combustión; el nitrógeno salvo por esta reacción secundaria se comporta como una sustancia inerte en la combustión. Algunas de las partículas e hidrocarburos no quemados producidos en la combustión son sustancias cancerígenas.

***M.C.: Parece claro que el ahorro energético también está ligado a la mejora de los procesos de combustión, lo que disminuye los niveles de contaminación. ¿es así de forma significativa?***

**A.L.:** En principio parece lógico pensar que a menor cantidad de combustible quemado menor producción de sustancias contaminantes. Pero el problema no es lineal, en el sentido de que reduciendo el consumo de combustible no se reduce proporcionalmente la producción de contaminantes. Por ejemplo, la aparición de óxidos de nitrógeno aumenta con la temperatura de combustión, entonces habría que reducir esta temperatura para disminuir los óxidos de nitrógeno, pero al bajar la temperatura suele bajar también el rendimiento de conversión a energía mecánica de la energía térmica liberada en la combustión, por lo que habría que añadir más combustible para obtener los mismos resultados, esto es la misma energía mecánica. En resumen, todo está muy relacionado y la variación de cualquier parámetro afecta inmediatamente a los demás. Ya desde el siglo pasado se sabe que el rendimiento de los motores tienen un límite ligado a la relación entre la temperatura máxima de combustión y la ambiental; al aumentar la primera se incrementa el rendimiento pero aumenta también la generación de óxidos de nitrógeno, que son muy difíciles de eliminar, lo que no es el caso de los óxidos de azufre, que se pueden quitar antes, durante o después de la combustión.

***M.C.: Cambiando un poco de tercio, el microsatélite UPM-Sat 1, que la Universidad Politécnica de Madrid envió al espacio el mes de julio del año 1995, se ha utilizado también para la experimentación sobre mecánica de fluidos. ¿Qué se pretende con este tipo de pruebas?***

**A.L.:** Incluye un experimento para estudiar la dinámica de los puentes líquidos en microgravedad. En un satélite se compensan las fuerzas gravitatorias con las fuerzas centrífugas debidas al movimiento del satélite, dando como resultado una gravedad residual pequeñísima, que teóricamente sería gravedad nula, pero que no se alcanza por motivos diversos. Estas variaciones de la gravedad residual afectan al puente líquido, lo que se utiliza como una forma de medida. Este experimento, contenido en el microsatélite, lo que pretende es demostrar la fiabilidad de este sistema de medición de la gravedad residual, ya que ésta afecta al estudio de muchos fenómenos observados en las naves espaciales.

***M.C.: ¿Cuál es la utilidad de los motores de combustión en el espacio? ¿Puede utilizarse la energía solar para conseguir desplazar este tipo de motores?***

**A.L.:** En el espacio también son necesarios los motores para el control de posición de los satélites y para mantenerlos con la orientación apropiada. Esos motores deben tener el rendimiento más alto posible para poner la menor cantidad de combustible en órbita, y no hay que olvidar que el tiempo de operación del satélite puede estar también ligado al combustible disponible.

Los paneles solares en los satélites se pueden utilizar para la alimentación de los ordenadores y otras tareas pero no se utilizan para la propulsión, que generalmente es química. Es cierto que se han

## PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN LOS ÚLTIMOS AÑOS

- Durante el periodo 1960-1975, su trabajo en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial estuvo subvencionado de manera continuada, por varios contratos de la Army Research Office of Scientific Research, US Forest Service, European Space Agency
- *Problemas fluidodinámicos de la fusión por confinamiento inercial*, Junta de Energía Nuclear, 1976-1980.
- *Asymptotic techniques in ignition theory*, US Army European Research Office, 1979-1980.
- *Heterogeneous combustion processes under microgravity condition*, Agencia Europea del Espacio, 1986-1988.
- *Estructura, dinámica y estabilidad de procesos de combustión*, CAYCIT (Nr 2291/83), 1983-1986.
- *Dinámica de procesos de combustión*, CICYT (PB86/0497), 1987-1990.
- *Modelos sobre la radiación emitida en llamas de difusión de gases industriales*, ENAGAS 1989.
- *Análisis de combustión de gotas en microgravedad*, Agencia Europea del Espacio, 1989.
- *Análisis de Procesos de Combustión*. Proyecto de colaboración C91-013001. Ayuda de la Agencia Española de Cooperación Internacional. En cooperación con la Facultad de Ingeniería de la UNAM de México. 1990.
- *Problemas básicos de combustión en microgravedad*. Proyecto ESP-90-0187. CICYT, 1991-1993.

Reduciendo el consumo de combustible no se reduce proporcionalmente la producción de contaminantes

desarrollado propulsores, de tipo electrotérmico, que utilizan la energía eléctrica, que recogen los paneles solares, para calentar en un cámara el gas propulsante, que también hay que transportar a la órbita, antes de dejarle salir con velocidad supersónica por la tobera del motor.

***M.C.: Una disciplina como la ingeniería se asocia en pocas ocasiones con las labores de investigación y se suele asociar habitualmente a la práctica. ¿Es real esta separación entre la investigación y la práctica?***

**A.L.:** La ingeniería aprovecha los materiales y las fuentes de energía para desarrollar máquinas útiles para el ser humano. Utiliza todos los conocimientos de la ciencia que, aprovechando la energía y los materiales, puedan ayudarle a diseñar máquinas, instalaciones y construcciones útiles al hombre. Ésa es la preocupación del ingeniero, y en ese programa intervienen muchos factores como son, para empezar, la concepción y el diseño de los sistemas, después de la construcción y organización de la planta donde se va a hacer la fabricación, y posteriormente el montaje, utilización y mantenimiento de todos los sistemas.

Intervienen muchos factores en la cadena productiva de la ingeniería y para atenderlos se necesita una gran diversidad de habilidades y de capacidades en los ingenieros. Hay unos que se dedican a la fabricación, otros al mantenimiento, otros a la comercialización de los productos, otros se ocupan de desarrollar o reunir los conocimientos científicos necesarios para la puesta en funcionamiento de los sistemas de ingeniería. Por su formación, el ingeniero se encuentra más cerca de las necesidades y sabe bien dónde están los problemas que tiene que resolver; de ahí la necesidad de que haya también ingenieros que se dediquen a la investigación científica.

***M.C.: El III Plan Nacional pretende potenciar el I+D (Investigación y Desarrollo) en las empresas, suponemos que precisamente con esta voluntad de acercamiento a las necesidades y problemas reales. Pero, ¿cuál es el nivel de desarrollo tecnológico de la industria en nuestro país? ¿Ha alcanzado el nivel suficiente como para representar un apoyo al trabajo científico que permita establecer mecanismos de colaboración?***

**A.L.:** Es muy importante que la investigación esté ligada a los productos industriales porque es una manera lógica de convencer a la sociedad de la trascendencia del I+D. La investigación científica prácticamente no existía en España en el XIX. Es en nuestro siglo cuando empiezan a aparecer nombres españoles ligados a la ciencia. Nuestro desarrollo científico ha sido muy grande en los últimos veinte, o quizá, treinta años. En especial los frutos se han visto en los últimos diez años al crecer el número de grupos activos dedicados a la investigación. Pero este incremento de la actividad científica no ha ido en paralelo con el desarrollo de la innovación tecnológica de las empresas. Y esto ha sido así porque arrancábamos de una situación en que las empresas operaban con licencias, y el I+D no se puede improvisar. De manera que en este momento, a mi entender, el desarrollo científico ha ido mucho más lejos que el tecnológico, que es más complejo y requiere un esfuerzo suplementario. Ha habido, en cierto modo, una desconexión entre la investigación científica de las universidades y el desarrollo tecnológico de las empresas. Hay que fomentar la relación universidad-empresa. De hecho, cada vez hay más programas en los que se busca esta conexión. Por ejemplo, nosotros participamos con la empresa de ingeniería SENER, junto con otros grupos universitarios y otras empresas europeas, en un programa, subvencionado por la CEE que busca reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno, modificando el modo de combustión de los turborreactores, a un 20 % del nivel actual.

***M.C.: Su prestigio profesional y su dilatada trayectoria le ha permitido observar los mejores centros de investigación, ¿qué elegiría para su escuela?***

**A.L.:** Me gustaría traer muchas cosas, pero creo que lo más importante sería trasladar aquí, a la universidad española, el ambiente que se da en esos laboratorios, en esos centros de excelencia. El ambiente se refleja muy bien en los seminarios, donde se expone el trabajo que están desarrollando profesores y alumnos; y la relevancia que este trabajo tiene para el avance de nuestros conocimientos científicos y su incidencia en el progreso de la humanidad. El ambiente incita a esforzarse para hacer contribuciones propias sin dejarse cohibir por la dificultad de la tarea. De todas formas hoy las universidades españolas se parecen mucho a las universidades de otros países; con un ambiente similar, se trabaja con ganas porque ya se ven los resultados.

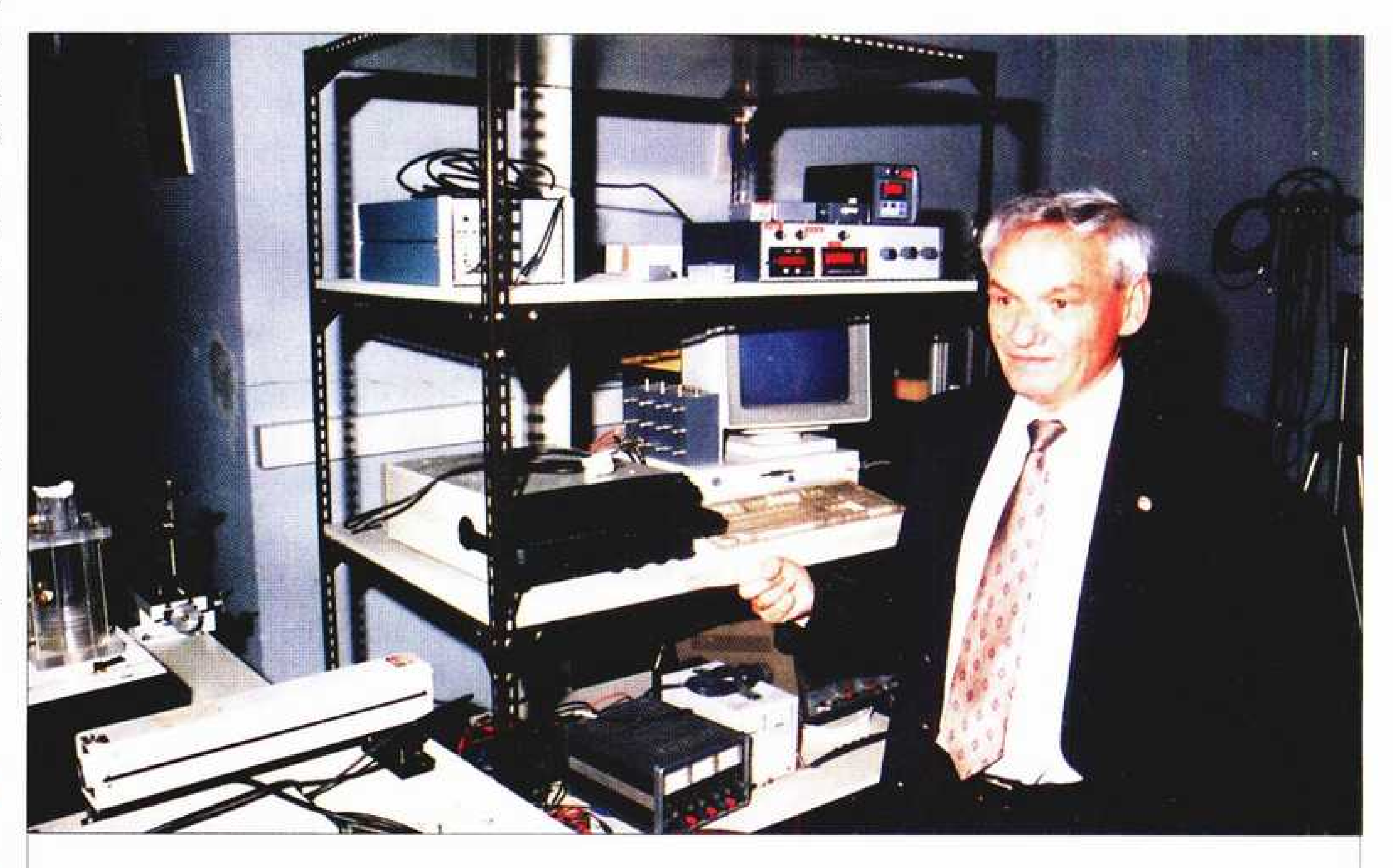
***M.C.: Finalmente, ha comentado en muchas ocasiones que tuvo la suerte, cuando era estudiante, de incorporarse como investigador a un «grupo de combustión». ¿Fue precisamente ese grupo el que marcó de forma decisiva su futuro?***

**A.L.:** Sí, yo tuve la fortuna de ser acogido por un grupo dedicado a la investigación en combustión, en un momento en que el esfuerzo investigador en el mundo en este área estaba en las primeras etapas de un crecimiento explosivo. De estos profesores aprendí que era posible contribuir al progreso científico con medios muy limitados, con nuestro esfuerzo, poniendo, eso sí, ilusión y entusiasmo.

Yo he tratado de transmitir a mis alumnos esa misma fe en las posibilidades de contribuir a las ciencias de la ingeniería en España. Creo, a la vista de las contribuciones que mis alumnos han hecho, que he formado un eslabón útil de la cadena en la escuela en la que me formé.

*Declaraciones recogidas por Ignacio Bravo.* ■

## Es posible contribuir al progreso científico con medios muy limitados



«¡Un niño de 5 años lo comprendería! ¡Traedme a un niño de cinco años!»
Groucho Marx

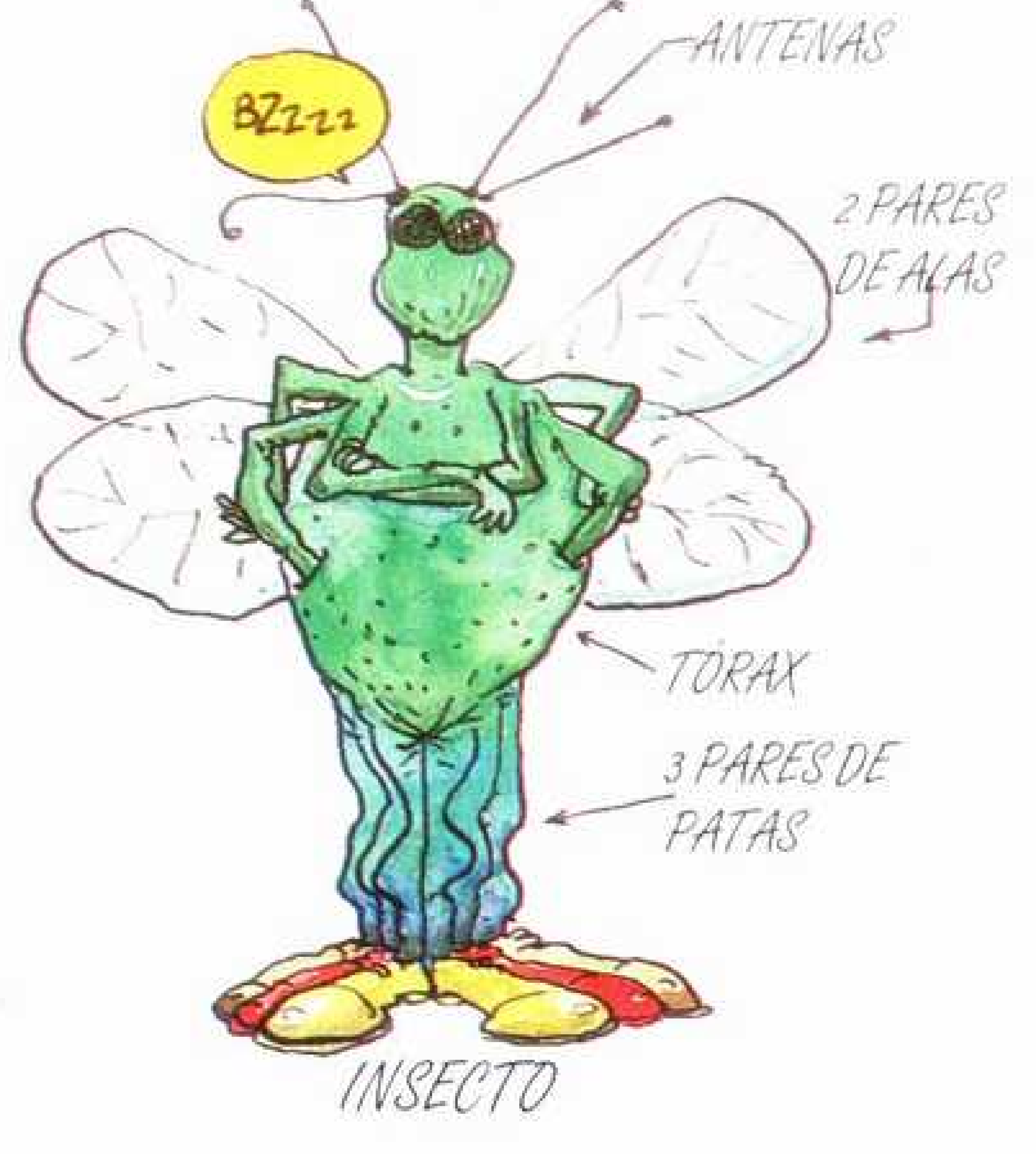
# LOS INSECTOS

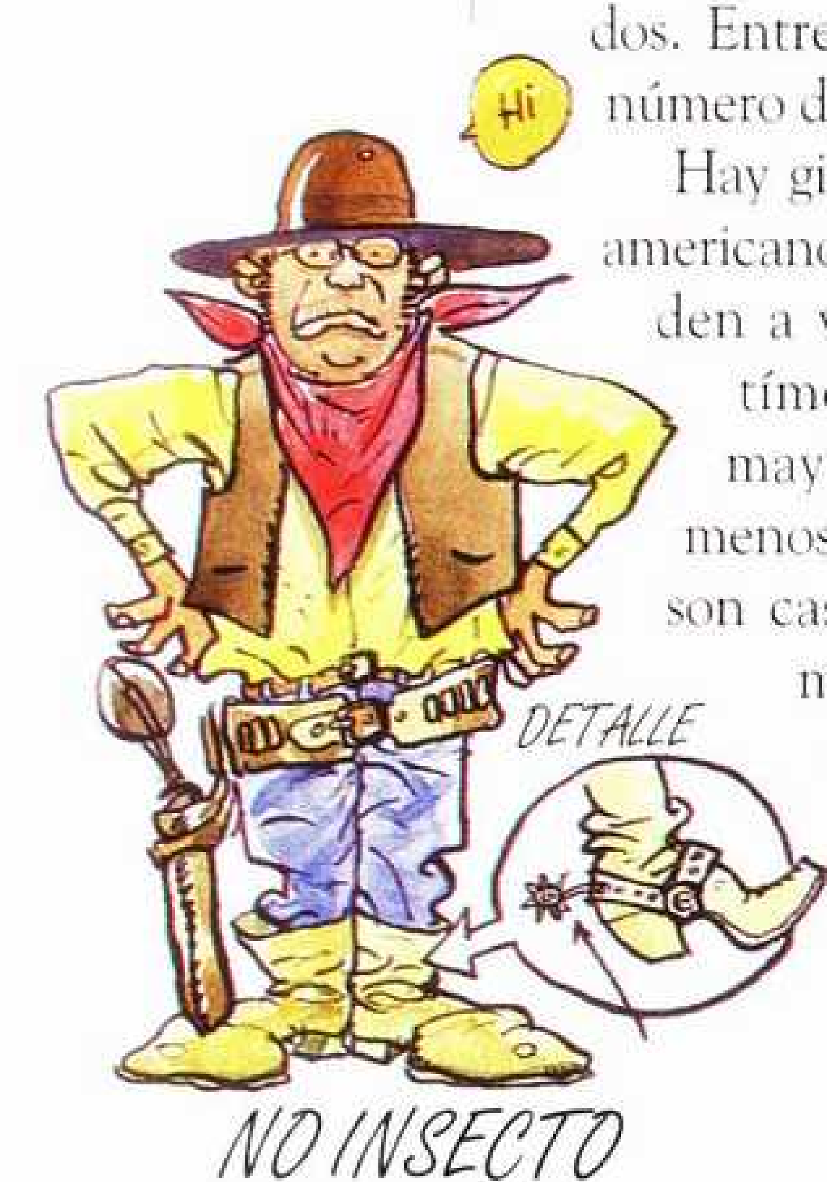
Maurice Mashaal

**Antes o después de la metamorfosis, tienen seis patas, el corazón en la espalda y unos ojos compuestos.**

## Las arañas, los ciempiés, los acáridos...

... no son insectos*. Un insecto consta esencialmente de: una cabeza, un tórax provisto de tres pares de patas y un abdomen formado de una decena de segmentos. El tórax suele llevar dos pares de alas. Estos animales, llamados también *hexápodos*, constituyen una clase dentro del fílum de los artrópodos, invertebrados de esqueleto externo y cuerpo articulado. Los crustáceos, las arañas, los escorpiones, los ciempiés y otras criaturas similares son también artrópodos. Entre las diferencias, figuran el número de patas y de antenas.




Hay gigantes, como el coleóptero americano *Titanus giganteus*, que miden a veces más de quince centímetros de longitud. Pero la mayoría de los insectos miden menos de un centímetro. Algunos son casi microscópicos, como los mimáridos, pequeñas avispas de 0,2 mm de tamaño que parasitan los huevos de otros insectos.

Los insectos han colonizado casi todos los medios: bosques, desiertos, ciudades, aguas dulces, cuevas, fuentes termales, etc. Sólo poquísimas especies viven en alta mar, como el garapito de los Sargazos (género *Halobates*), que patina sobre la superficie en busca de presas. Otras se han adaptado al hielo, como ciertos colémbolos (pequeños insectos desprovistos de alas). Se sabe incluso de moscas cuya larva vive en charcos de petróleo bruto (*Halaeomyia petrolei*). Pero la mayoría de las especies viven en tierra firme y en aguas dulces, especialmente entre los trópicos, donde el tiempo es caluroso y húmedo.

Estos animales han adoptado todos los regímenes alimentarios imaginables. Muchos son vegetarianos y, según las especies, comen madera, hojas, polen, chupan savia, etc. Los depredadores consumen pequeñas presas vivas (generalmente otros insectos). Las hay que chupan la sangre; otras se alimentan de excrementos (como el escarabajo pelotero), cadáveres, detritus.

**MAURICE MASHAAL** es periodista.
**CLAUDE CAUSSANEL y LOÏC MATILE,** pertenecen al Laboratorio de entomología, Museo nacional de historia natural, París.

## ¿Cuántos son?

Los insectos constituyen, con mucho, la clase de seres vivos más diversificada. Se han nombrado y descrito entre 800.000 y un millón de especies. La cifra no se conoce con precisión, pues las descripciones están desperdigadas en publicaciones muy variopintas, en distintas lenguas, y abarcan un periodo superior a dos siglos.

Los vertebrados (mamíferos, aves, reptiles, batracios y peces) sólo comprenden unas 45.000 especies. El número total de especies vivientes conocidas (incluidos los animales y los vegetales) es de 1.800.000 aproximadamente, el doble sólo que el número de insectos...

Cada año se describen del orden de 7.000 insectos nuevos, a lo que hay que añadir que algunos medios extremadamente ricos, como la canopea* de los bosques tropicales y ecuatoriales, están muy poco explorados. Los especialistas estiman el número real de insectos distintos entre tres millones y setenta millones.

Entre los insectos conocidos, los coleópteros (escarabajos, mariquitas, abejorros, etc.) dominan ampliamente, con unas 350.000 especies. Vienen luego los himenópteros (abejas, abejorros, avispas, hormigas, etcétera —125.000 especies—), los lepidópteros (mariposas —120.000 especies—), los dípteros (moscas, mosquitos, etcétera —100.000 especies—). Los demás grupos (chinches, langostas, saltamontes, pulgas, cigarras, cachipollas, libélulas, etc.) son menos numerosos.

## ¿Son nocivos? ¿Son útiles?

Algunos insectos son vectores de enfermedades, a veces graves (paludismo transmitido a través de mosquitos, enfermedad del sueño transmitido por la mosca tsé-tsé, etc.). Otros, cuando pululan, devastan los cultivos o las reservas de cereales (dorífora, filoxera, gorgojo, etc.). Otros incluso, como los tábanos, atacan el ganado. Como máximo, pueden considerarse nocivas algunos miles de especies: una pequeña minoría, responsable de grandes daños.

La mayoría de los insectos más bien son útiles, ya que ocupan un lugar primordial en la ecología de los medios terrestres. Contribuyen a descomponer la materia orgánica y a formar el humus y constituyen un eslabón esencial de la cadena alimentaria. Tres de cada cuatro plantas son polinizadas gracias a los insectos; su papel en la agricultura es, pues, capital.

Ciertas especies sirven directamente al hombre: las abejas, el gusano de seda, las drosófilas (investigaciones biológicas y genéticas). Las mariquitas suministran la laca de China y colorantes rojos para los textiles y los alimentos. El maná, que supuestamente alimentó a los hebreos durante su éxodo a través del desierto, podría haber sido un jugo formando sobre los tamariscos a resultas de picaduras de ciertas mariquitas (*Trabutina mannipara*).

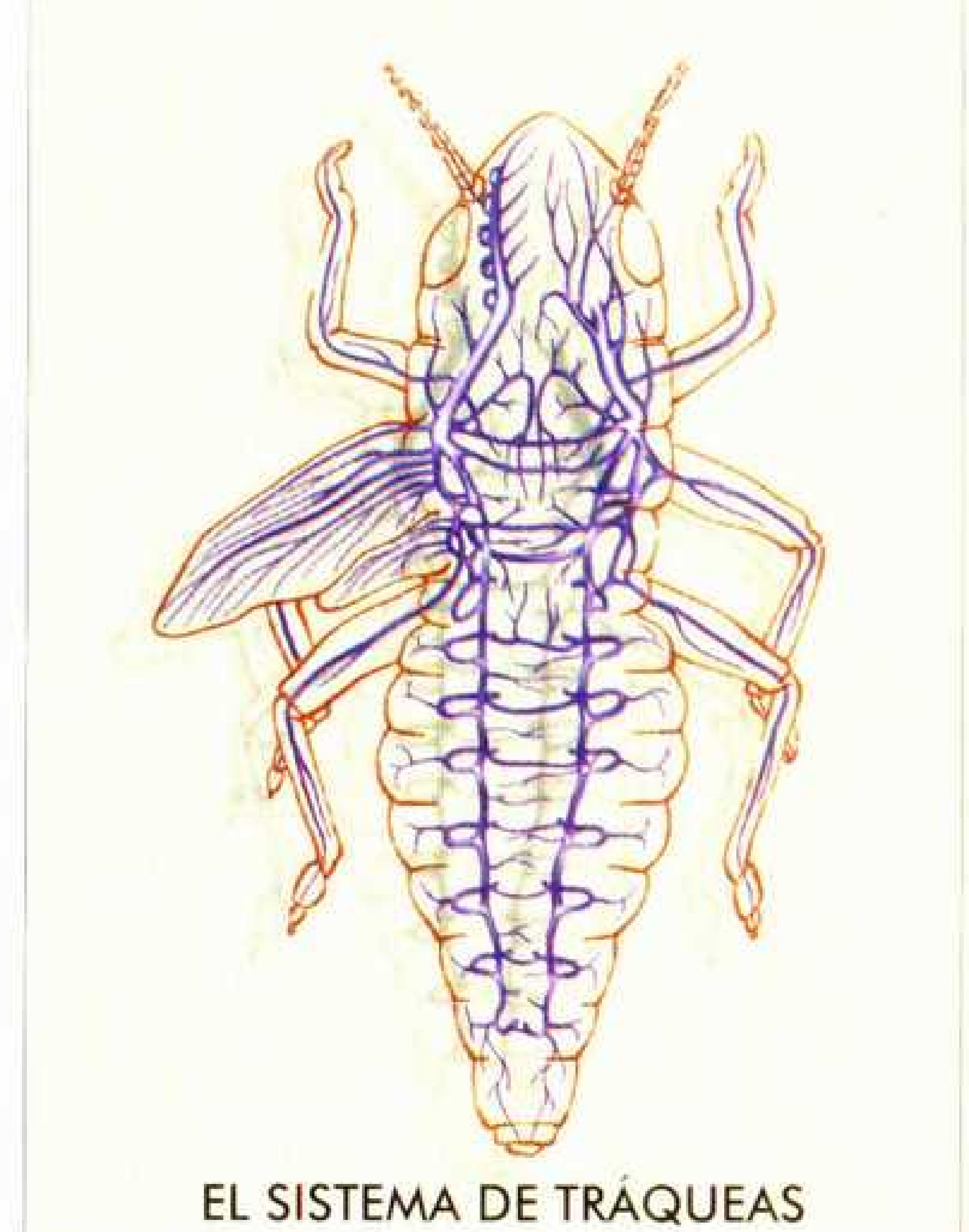
## ¿Tienen corazón, pulmones, cerebro?

El corazón se reduce a un tubo contráctil dispuesto dorsalmente. Este órgano bombea el líquido que baña el abdomen y lo expulsa hacia el tórax y la cabeza a través de una aorta. El líquido se llama hemolinfa; no se trata propiamente de sangre, pues no desempeña ningún papel respiratorio, no posee glóbulos rojos y no circula por un sistema vascular cerrado. Su función esencial consiste en distribuir las materias nutritivas y encaminar los desechos del metabolismo hacia los órganos de excreción (los tubos de Malpighi).

La respiración suele efectuarse por medio de tráqueas. Se trata de tubos de paredes rígidas, cuyas aberturas están en el tórax y el abdomen. Las tráqueas se ramifican, formando una red que lleva el oxígeno a todas las partes del organismo y evacúa el dióxido de carbono. Estos intercambios se realizan por difusión, aunque en las especies activas unas contracciones rítmicas del abdomen permiten una ventilación más eficaz. Los procesos de difusión a que recurren la circulación de la hemolinfa y la respiración, aunque eficientes, sólo son lo bastante rápidos para cortas distancias. Por ello, el tamaño de los insectos tiene sus límites.

tubos de Malpighi (órganos de excreción)
corazón
aorta
cerebro
ano
ovario
tubo digestivo
glándulas salivares
oviscapto
espermateca
sistema nervioso

(Weber, Grundriss der Insektenkunde, Gustav Fischer Verlag, 1966)


EL SISTEMA DE TRÁQUEAS

(Grandi, Instituzioni di Entomologia generale, Calderini, 1966)

El sistema nervioso, por su parte, está menos centralizado que en los vertebrados. Por ejemplo, un tórax de insecto seccionado del resto del cuerpo todavía es capaz de andar... El cerebro, alojado en la cabeza, constituye sin embargo el principal elemento de una serie de ganglios escalonados a lo largo del cuerpo en el lado ventral (debajo del tubo digestivo) y unidos entre sí.

## ¿Tienen sistema inmunitario?

**INSECTUS**
En latín, esta palabra significa cortado (*entoma* en griego), por referencia a las separaciones, en general bastante claras, entre cabeza y tórax y entre tórax y abdomen.

**CANOPEA**
Es el nivel superior de un bosque, formado por las copas de los árboles.

Los insectos disponen de medios eficaces de defensa contra los microorganismos. Si se atraviesa la cutícula que protege un insecto, al cabo de media hora se ha constituido un sistema de defensa. En los años 1930, se descubrió que esta respuesta inmunitaria rápida hacía intervenir células contenidas en la hemolinfa (respuesta celular), así como distintas sustancias (respuesta humoral).

Si bien la respuesta celular de los insectos es mal conocida, en los últimos años se han hecho progresos importantes en lo relativo a la respuesta humoral, gracias a trabajos sobre la drosófila. Se ha establecido así que, a resultas de una agresión, el cuerpo graso (cuyo papel es similar al del hígado) y determinadas células de la hemolinfa secretan rápidamente una batería de moléculas antibacterianas, antifúngicas y tal vez también antivíricas que podrían proporcionarnos nuevos medicamentos. Esta reacción no es específica de los microorganismos agresores y no procura «memoria inmunitaria». Presenta fuertes parecidos con la memoria inmunitaria no específica de los vertebrados (la cual, aunque muy importante, es mal conocida, contrariamente a la respuesta que pone en juego los anticuerpos específicos).

## ¿Qué perciben?

Se encargan de la visión dos ojos compuestos, es decir, formados por numerosos ojos elementales llamados omatidios. Vistos con lupa, estos ojos compuestos presentan facetas hexagonales, cada una de las cuales corresponde a un omatidio. El número de omatidios varía con las especies: algunas unidades en el caso de las hormigas, de vida esencialmente subterránea, y más de 28.000 en ciertas libélulas, cuyos ojos ocupan la mayor parte de la cabeza. A los ojos compuestos hay que añadir a menudo dos o tres ojos pequeños simples (los ocelos), cuya función todavía no está suficientemente clara.

La visión de los insectos es considerada mediocre por lo que respecta a la percepción de las formas. Pero estos animales distinguen los colores (no necesariamente los mismos que nosotros), a veces son sensibles a la polarización luminosa (como en el caso de las abejas) y su percepción de los movimientos supera con mucho la nuestra. En total, el poder visual puede ser notable... ¡Tratad de atrapar una mosca!

Dispersos por todo el cuerpo hay pequeños cilios táctiles y receptores químicos. Estos órganos, sin embargo, son más numerosos en los apéndices: antenas, piezas bucales, patas, aparato de puesta, etc. Estos minúsculos sensores informan sobre el tacto, el gusto y los olores, la humedad, la temperatura y otros parámetros. Por ejemplo, el saltamontes hembra debe determinar, por introducción de su aparato de puesta en el suelo, si la salinidad del terreno conviene o no a sus huevos. La sensibilidad de los receptores químicos es a veces impresionante. Gracias a sus antenas, los machos de ciertas mariposas nocturnas detectan cantidades ínfimas de sustancias (feromonas) emitidas por una hembra a varios kilómetros de distancia.

Muchos insectos perciben también los sonidos (no necesariamente a las mismas frecuencias que nosotros). Así ocurre, en particular, con las especies que estridulan: langostas, grillos, cigarras, etc. En los saltamontes, por ejemplo, cada una de las patas delanteras lleva un tímpano en la parte alta de la tibia. Para producir sonidos (destinados a atraer a un compañero sexual o a marcar el territorio), la naturaleza ha inventado varios dispositivos: roce del ala con la pata en las langostas, órgano análogo a un tambor en las cigarras.

## ¿Cómo se reproducen?

En general, por vía sexual. Hay machos y hembras, a veces de aspecto bastante distinto. Los órganos genitales están situados hacia el extremo del abdomen. Las libélulas ocupan un lugar especial, pues el macho posee dos órganos sexuales claramente separados. El órgano genital, que produce el esperma, está en el extremo del abdomen; el órgano de copulación, en cambio, se encuentra hacia su inicio, cerca del tórax. Por ello, antes de acoplarse, la libélula macho hace una especie de gimnasia para llevar la simiente hasta el órgano de copulación. El apareamiento exige de ambos participantes una postura inhabitual que, vista lateralmente, se parece a un corazón.

Como en otros artrópodos, las hembras de los insectos poseen una espermateca (a veces varias), una especie de bolsa interna donde almacenan los espermatozoides a la espera de las circunstancias favorables para la puesta. En ciertas libélulas, el pene del macho puede retirar el contenido precedente de la espermateca antes de introducir su propia simiente: una manera de burlar a los amantes anteriores...

Otro modo de reproducción: la partenogénesis, es decir, el nacimiento de individuos a partir de huevos no fecundados. Es el caso de ciertos fásmidos. Los pulgones también utilizan los dos modos, según las circunstancias. Otro método aún: en ciertas avispas parásitas, un solo huevo puede escindirse en varios cientos de embriones.

La reproducción de los insectos presenta numerosas variantes, sobre todo si se consideran los comportamientos ligados a la búsqueda de compañeros, las paradas nupciales y la puesta. Una curiosidad entre otras muchas: la ofrenda nupcial de las moscas del género *Empis*. El macho sólo es aceptado por la hembra si le ofrece una presa envuelta en seda, ¡un regalo que ni siquiera será consumido!

## ¿Desde cuándo existen?

Las más antiguas huellas fósiles de insectos datan del Devónico, hace unos 400 millones de años, la misma época a la que corresponden los peces y los batracios pero muy anterior a la de las aves y los dinosaurios. Sus antepasados artrópodos no son conocidos, pero se cree que los insectos y los miriápodos (ciempiés) surgieron de la misma rama del árbol de la evolución.

Primeras especies aparecidas: las que carecían de alas (colémbolos, dipluros, etc.). La mayoría de grupos de insectos existían ya en el Pérmico (hace 250 millones de años). Pero aproximadamente un tercio de los grupos ancestrales han desaparecido. Los insectos antiguos, por tanto, no necesariamente se parecían a las formas actuales: una especie de libélula del Carbonífero (hace 350 millones de años), *Meganeura monyi*, medía 70 cm de envergadura.

Las plantas y los insectos coevolucionaron debido a sus relaciones de mutua dependencia.[I] La diversificación explosiva de los insectos, hace unos 280 millones de años, concidió con la expansión de los vegetales terrestres. Atestiguan esta coevolución unas asociaciones sorprendentemente precisas y exclusivas, como entre una orquídea de Madagascar, *Angraecium sesquipeddale*, y su polinizador, la mariposa *Xantophan morgani*, cuya trompa es lo bastante larga (29 cm) para alcanzar el néctar de la flor.



## ¿Cómo adquirieron sus alas?

Los insectos son los únicos invertebrados capaces de volar. Por falta de datos fósiles suficientes, todavía no hay una explicación convincente de la aparición de las alas.

Se enfrentan dos teorías. Una de ellas afirma que las alas se desarrollaron a partir de unas excrecencias planas del tórax que, en las formas primitivas, pudieron servir para aterrizar correctamente después de una ventolera. La otra considera las alas como una extensión de órganos de respiración acuática (las traqueobranquias, como las que poseen las larvas de cachipollas) que se fueron endureciendo para, por ejemplo, estabilizar la natación.

Las formas varían. Las libélulas y las cachipollas tienen unas alas densamente inervadas; las de las mariposas están recubiertas de minúsculas escamas; el primer par de alas de los coleópteros es rígido e interviene poco en el vuelo; el segundo par de los dípteros se reduce a dos pequeños órganos estabilizadores en forma de haltera, etc.

En las langostas y las libélulas, los dos pares de alas baten independientemente, mientras que en la mayoría de los demás insectos son solidarias.

Pese a que la primera técnica es considerada como la más arcaica, las libélulas figuran entre los mejores insectos voladores. Con 20 a 50 aleteos por segundo, pueden avanzar, retroceder, mantenerse inmóviles en el aire, cambiar bruscamente de dirección y efectuar diversas acrobacias aéreas. Algunas vuelan a más de 30 o 40 km/h.

El aleteo puede ser mucho más rápido: unos 200 por segundo en las abejas, 600 en los mosquitos, hasta 1.000 por segundo en algunas moscas de pequeño tamaño. Unas cadencias tan rápidas no pueden ser directamente mandadas por influjos nerviosos. Se mantienen automáticamente, gracias a las propiedades de ciertos músculos y a la elasticidad del caparazón del tórax: la contracción de ciertos músculos lleva como consecuencia la extensión de otros, que tienen la peculiaridad de reaccionar contrayéndose, lo cual activa los primeros músculos y así sucesivamente.

*Mundo científico* ha publicado
(I)
«Los primeros ecosistemas terrestres», enero de 1993.
(II)
«La resistencia de los insectos a los insecticidas», octubre de 1991.

## ¿Para qué sirve la metamorfosis?

La vida de un insecto alado, que dura días o años según las especies, comprende dos o tres fases muy distintas, tanto desde el punto de vista de la morfología como del modo de vida. Lo que sale del huevo es una larva desprovista de alas, cuya actividad consiste esencialmente en alimentarse. Dado que la cutícula, tegumento y esqueleto externo del insecto, es rígida, para crecer debe sufrir sucesivas mudas. Cuando la larva llega al término de su desarrollo, se produce una transformación extraordinaria cuyo resultado es el insecto adulto, alado y capaz de multiplicarse.

Esta metamorfosis, que requiere unos mecanismos hormonales complejos, se desarrolla siguiendo dos guiones. En la mayoría de los grupos (coleópteros, mariposas, abejas, moscas, etc.), la metamorfosis se llama completa: la larva, muy distinta del adulto, se transforma primero en una ninfa inmóvil. Durante esta etapa intermedia, el cuerpo del insecto va reorganizándose profundamente y da lugar, después de una última muda, al insecto adulto. El ejemplo típico es el de la mariposa: después de haber vivido su existencia de oruga, el insecto se rodea de un capullo para pasar al estado de ninfa, antes de transformarse en adulto.

En los insectos con una metamorfosis llamada «incompleta» (cachipollas, libélulas, langostas, chinches, pulgones, etc.), la morfología de la larva no difiere tanto de la del adulto. En tal caso, la metamorfosis se efectúa durante la última muda sin paso por el estado inmóvil de ninfa. Los insectos primitivos carentes de alas, como los colémbolos o los peces plateados, no sufren metamorfosis.

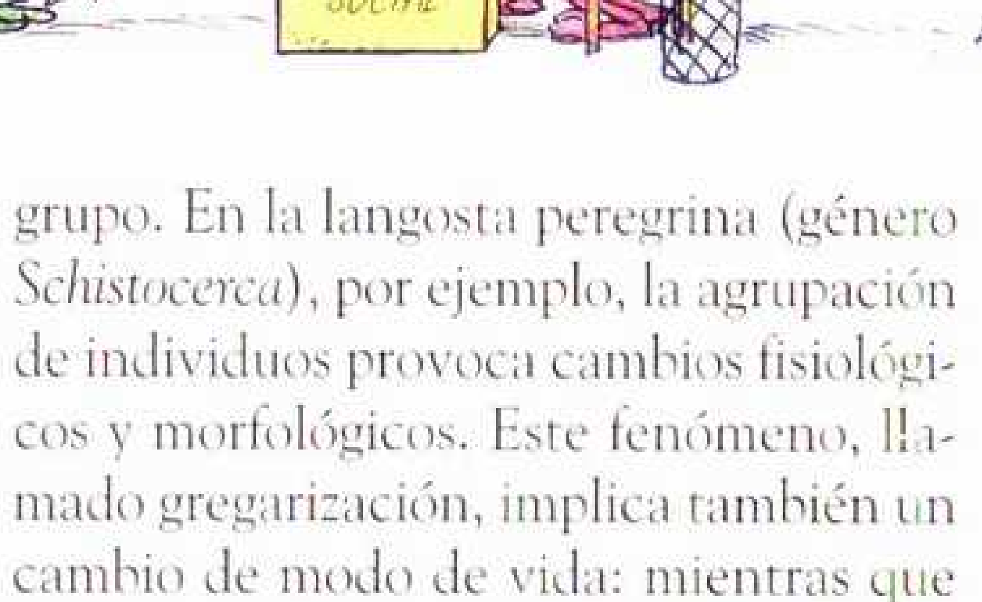
La metamorfosis ha contribuido sin duda al extraordinario éxito de los insectos. Se le pueden asociar varias ventajas: diversificación de los recursos alimentarios, economía del metabolismo, adaptación al ritmo de las estaciones, etc. En contrapartida, la metamorfosis es un momento delicado durante el cual el animal es muy vulnerable a los depredadores; además en el desarrollo de esta compleja muda menudean los accidentes.

*Para más información*

- M. Chinery, *Insectes d'Europe occidentale*, Arthaud, 1988.
- P. Ferron, *Vivre avec les insectes*, colección Dominos, Flammarion, 1993.
- P.-P. Grassé (dir.), *La vie des animaux*, vol. 2, Larousse, 1969.
- «Insectes», en *Encyclopaedia Universalis*, 1985.
- «Insects», en *The New Encyclopaedia Britannica*, *21*, 648, 1995.
- «La protection des espaces naturels et de l'entomofaune», actas de la reunión de la Sociedad entomológica de Francia organizada en 1994 en Grenoble por el club entomológico «Rosalia», editado por el Museo de historia natural de Grenoble con el concurso de la Unión de entomología francesa, 1996.

## ¿Cómo aparecieron los insectos sociales?

Todas las termitas, todas las hormigas, ciertas abejas y ciertas avispas viven en el seno de auténticas sociedades: unos grupos extremadamente organizados y jerarquizados en cuyo seno las tareas (reproducción, alimentación, cuidado de los huevos y las larvas, etc.) corren a cargo de distintas clases de individuos. En las abejas, por ejemplo, una reina única pone los huevos, mientras que las obreras, hembras estériles, desempeñan otras funciones útiles para el panal. Éste contiene también algunos machos, o zánganos, cuyo papel se limita a la reproduccción. Estas sociedades están reguladas por una red de interacciones complejas y muestran sofisticados comportamientos. La coordinación social recurre a medios esencialmente químicos, a través de unas moléculas emitidas por cada individuo, las feromonas.




La aparición de sociedades de insectos cuyos miembros están especializados es un problema apasionante todavía no resuelto por la biología teórica. Es difícil, efectivamente, comprender cómo la selección natural ha podido favorecer unos individuos que no dejan descendencia.

Aunque no se trata de sociedades propiamente dichas, se encuentran en otras especies espectaculares efectos de grupo. En la langosta peregrina (género *Schistocerca*), por ejemplo, la agrupación de individuos provoca cambios fisiológicos y morfológicos. Este fenómeno, llamado gregarización, implica también un cambio de modo de vida: mientras que los solitarios son sedentarios, los individuos gregarios emigran en masa, causando graves daños.

## ¿Por qué son resistentes a los insecticidas?

Toda población presenta variaciones genéticas individuales que pueden estar relacionadas con la sensibilidad a alguna sustancia. Cuando se aplica un insecticida a una vasta población de insectos, algunos, en general, consiguen sobrevivir. Si se emplea repetidamente el mismo insecticida, los individuos resistentes serán seleccionados y el producto irá perdiendo paulatinamente su eficacia. El problema se está haciendo cada vez más agudo (sobre todo para la agricultura y la lucha contra el paludismo) y es objeto de numerosas investigaciones.[11] El empleo inmoderado e irreflexivo de insecticidas en los últimos decenios ha conducido, en ciertas especies, a la emergencia de cepas resistentes a toda la gama de productos disponibles. Se imponen, pues, nuevas estrategias: mantenimiento de las poblaciones de elementos nocivos por debajo de un umbral aceptable combinando productos químicos, lucha biológica y prácticas culturales adaptadas.




## ¿Hay que protegerlos?

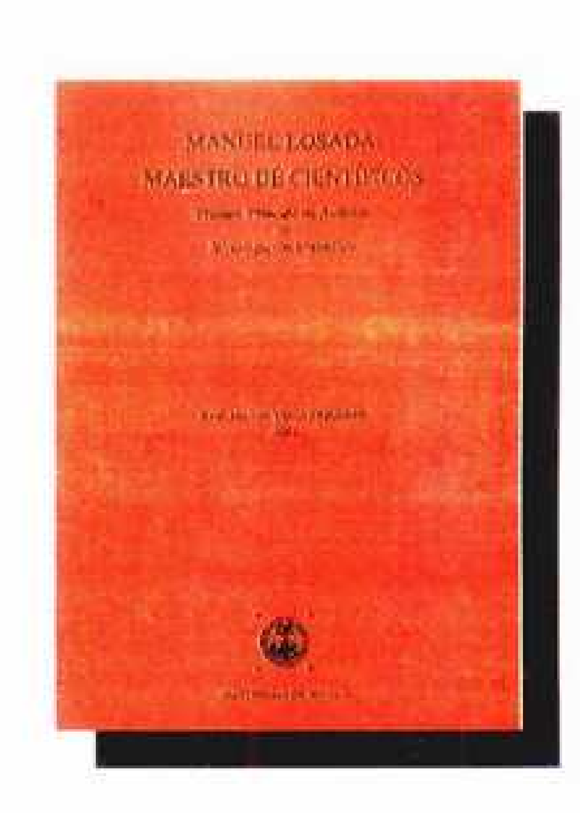
La fauna entomológica y su diversidad sufren de lleno la acción del hombre (agricultura intensiva, contaminación, urbanización, deforestación, etc.). Los estudios cuantitativos son raros (ya que son difíciles y caros) pero todos los datos indican que las poblaciones de insectos han menguado considerablemente en pocos decenios. Se sabe, por ejemplo, que no menos de diez especies endémicas de las islas Hawaii han desaparecido.

Si se desea preservar los insectos y su fantástica diversidad, es prioritario proteger sus medios. Muchas veces, la legislación se limita a prohibir la captura de tal o cual especie, lo cual es considerado por la mayoría de los especialistas como ineficaz e inaplicable. ■










JOSÉ IGNACIO MURO, FRANCESC NADAL Y LUIS URTEAGA

## GEOGRAFÍA, ESTADÍSTICA Y CATASTRO EN ESPAÑA 1856-1870

Ediciones del Serbal (Colección «La estrella polar»), Barcelona, 1996 (2.500 ptas.)

De vez en vez el viajero o el navegante necesita mirar a la estrella polar para orientarse. Los buenos libros cumplen ese papel de orientadores y guías en la formación del conocimiento y en la promoción del gusto al saber. El estudio culminado por los geógrafos Muro, Nadal y Urteaga en el marco de un proyecto de investigación sobre «Desarrollo científico y dinámica territorial en la España contemporánea», dirigido por Horacio Capel, y financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia, satisface con creces esa función de obra guía y orientadora de nuestros conocimientos sobre el papel que desempeñó la ciencia y la tecnología en la sociedad española del siglo XIX en general, y en la construcción del Estado liberal en particular.

¿Qué han pretendido estos profesores de universidades de Tarragona y Barcelona en un libro que combina rigor y amenidad?: reconstruir los avatares y vicisitudes de una de las grandes instituciones científicas que promovieron los liberales de la época de Isabel II para organizar el territorio español. La Comisión de Estadística del Reino creada en 1856, y transformada en Instituto Geográfico en 1870, no sólo fue grande por el volumen de masa crítica de científicos, tecnólogos y artistas que movilizó en su andadura, sino por las complejas y ambiciosas tareas que emprendió.

Las decenas de estadísticos, geógrafos, ingenieros, topógrafos, geodestas, delineantes y grabadores, movilizados por esa institución civil adscrita a la Presidencia del Consejo de Ministros, tuvieron como objetivo afrontar un triple desafío: contar los recursos del reino, mediante la elaboración de un censo general de población; medir el territorio a través del mapa topográfico y el catastro e inventariar los recursos naturales, evaluándolos y representándolos.

Ese ambicioso programa de trabajo, que pretendía sentar las bases de una planificación del desarrollo económico, sólo fue cumplido en una pequeña parte y sus resultados finalmente fueron limitados. Entre ellos cabe destacar: el censo general de población de 1860, la publicación de cinco gruesos volúmenes del *Anuario Estadístico de España*, el levantamiento definitivo de la red geodésica española y la elaboración de diversos mapas temáticos, como el plano general de la cuenca del Guadalquivir, el mapa geológico de la provincia de Madrid, o el bosquejo dasográfico de la provincia de Oviedo, realizado en 1862, de bellísima factura. Una reproducción de estas piezas artísticas puede encontrarlas el lector entre las páginas del libro.

Tal distancia entre desmedidas ambiciones y modestas realizaciones se debió a un complejo haz de factores de orden político, administrativo, económico, científico y técnico. Los imperceptibles avances en la ejecución del catastro se debieron, por ejemplo, no sólo a las restricciones presupuestarias, o a la oposición política de los grandes propietarios, sino también a su complejidad técnica, a las limitaciones cartográficas y estadísticas de la época, y al hecho de que se pretendió unir el catastro con el levantamiento de la carta geográfica.

Así pues Muro, Nadal y Urteaga nos ofrecen una mirada renovada sobre el desarrollo científico-técnico español de mediados del siglo XIX, época en la que hubo amplias vinculaciones con los centros de saber europeos en los campos de la geografía y de la ingeniería, y capacidad no sólo para recibir y poner en marcha innovaciones técnicas, sino también para crear sofisticados instrumentos de precisión, que lograron tener una circulación internacional, como fue el caso de la que fue conocida como «regla española», diseñada por Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero, en colaboración con un constructor francés, para medir la base central de la red geodésica española en Madridejos.

**Leoncio López-Ocón** ■

AUTORES VARIOS

## ASÍ SON LAS COSAS

Editorial Debate, Madrid, 1996 (2.900 ptas.)

Parece lógico pensar que cuando deseamos informarnos sobre los modos de pensar de un autor, sobre sus teorías o sobre su particular punto de vista en referencia a un tema de discusión optamos por leer alguno de sus escritos; bien sean libros, bien revistas. Del mismo modo, cuando nuestra intención es saciar nuestra curiosidad sobre algún punto o disciplina concretos, el *modus operandi* consiste en recurrir —nuevamente— a los libros o revistas especializadas en esa materia.

En *Así son las cosas*, obra presentada por editorial Debate, nos encontramos con una grata sorpresa: la posibilidad de poder elegir entre una larga lista de variados temas, siempre referentes al mundo científico: por qué hay diferencias en el color de la piel de los seres humanos; qué diferencia existe entre mente y cerebro; cuál es la parte positiva de cometer errores; en qué se diferencian la materia viva de la no viva; cómo se explica el complejo proceso de la comunicación humana; cuándo comenzó el tiempo; cómo aprender de lo que no existe; quién tiene la culpa de lo que somos; cuánto puede durar la especie humana sobre la Tierra; qué se puede decir de las realidades virtuales sociales...

Pero, no sólo eso, sino que, como si de un programa informático se tratara, podemos seguir otro menú de elección, el de autores. Ínclitos científicos de la categoría de Richard Dawkins, Paul Davies, Robert Shapiro, Lynn Margulis, Stephen Jay Golud, por citar sólo unos cuantos, nos ofrecen su particular visión sobre diversos aspectos científicos.

Finalmente este libro intenta «ofrecer al lector una oportunidad de observar las mentes en acción de los grandes científicos y pensadores: las preguntas que se plantean, los métodos que utilizan, los procesos mentales que siguen en su intento de comprendernos a nosotros mismos y al mundo que nos rodea». Sin duda, lo han conseguido.

**Iñaki Fernández** ■

JOSÉ MARÍA VEGA PIQUERES (ED.)

# MANUEL LOSADA: MAESTRO DE CIENTÍFICOS

Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica

Secretariado de publicaciones de la Universidad de Sevilla, Sevilla, 1996 (2.200 ptas.)

El día 10 de noviembre de 1995, la Universidad de Sevilla tributó un merecido homenaje al Profesor Manuel Losada Villasante, Catedrático de Bioquímica y Biología Molecular, con motivo de haber recibido el Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica. Me es grato decir que la Universidad de Sevilla ya propuso al Profesor Losada Villasante, como candidato al «Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica, 1993». Dicha propuesta fue acompañada con numerosas cartas de Instituciones y prestigiosos científicos nacionales y extranjeros, que apoyaron sin reservas la nominación del Profesor Losada Villasante para este galardón, y que demostraban, sin duda alguna que el Profesor Losada es un eminente científico de la comunidad internacional. La ingente labor desarrollada a lo largo de 35 años de dedicación a la docencia y la investigación científica ha llegado de manera significativa, no sólo a la comunidad científica mundial, sino también a la sociedad en general.

Como Rector de la Universidad, el homenaje al Profesor Losada me pareció singular y trascendente. Singular porque no es frecuente congratularnos de un premio de investigación tan prestigioso como este. La Universidad de Sevilla cuenta con excelentes investigadores y magníficas escuelas científicas, pero son pocos los que alcanzan un reconocimiento público tan elevado a su meritoria labor investigadora. Esto ha ocurrido con el Profesor Losada Villasante, y la Universidad de Sevilla, como Institución que tiene el honor de contar con él se congratula y lo felicita, junto a su mujer y colaboradora Dña. Antonia Friend. Ellos mejor que nadie saben de los sacrificios y sinsabores que hay en el camino del éxito. También quiero hacer extensiva esta felicitación al Departamento de Bioquímica Vegetal y Biología Molecular, y a la Facultad de Biología, porque una parte importante han jugado para conseguir este premio.

Decía también que era un acto trascendente. Conozco al Profesor Losada Villasante desde hace tiempo y me consta su fama de profesor exigente y de investigador de calidad. Me van a permitir algún comentario sobre su condición investigadora. Creo que Losada es un investigador revolucionario, porque se plantea desafíos, contradice deliberadamente la cordura existente y desarrolla teorías e hipótesis que parecen fantasías. Pero este tipo de fantasías, al principio confusas e inciertas, terminan produciendo resultados importantes.

Un aspecto esencial de la dilatada y valiosa producción del Profesor Losada es la publicación de más de 200 trabajos originales de investigación y de revisión en revistas y libros científicos de ámbito internacional, así como la presentación de sus resultados en Congresos, Seminarios y Reuniones científicas nacionales e internacionales (unas 150 comunicaciones recogidas en libros de resúmenes de estas reuniones). El Profesor Losada también es autor de libros de texto y de capítulos en los mismos, así como de artículos de divulgación científica.

La presencia del Profesor Losada en reuniones científicas nacionales e internacionales, así como su asesoramiento científico y participación en Sociedades y Comités de distinta índole son ampliamente solicitados, siendo, asimismo, miembro de las Academias de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Madrid), de Medicina (Sevilla) y Akademie für Umweltgragen (Alemania). Ha pronunciado más de un centenar de conferencias en Universidades y Centros de Investigación, de ellas más de 40 han tenido lugar en diferentes países como Alemania, Argentina, Austria, Bélgica, Canadá, Chile, Dinamarca, Estados Unidos, Francia, Grecia, Holanda, Inglaterra, Italia, Noruega, Portugal, Rusia, Suiza y Venezuela.

El Profesor Losada se ha preocupado también por aspectos prácticos de la investigación científica, especialmente por la concepción y desarrollo de sistemas bioquímicos y biológicos capaces de llevar a cabo la efectiva transducción de las energía solar en energía química útil, en la forma de compuestos simples de interés práctico, tales como amoniaco y peróxido de hidrógeno. La utilización de microalgas fijadoras de nitrógeno atmosférico para la producción, a expensas de energía solar, de biomasa rica en proteína y otros compuestos de valor es uno de los temas cuya resolución científica y tecnológica ocupa su interés actualmente. Su participación activa en investigaciones de este tipo nace del afán de contribuir directamente a la resolución de la crisis de energía y alimentos, problemas de gran alcance científico y social.

Las investigaciones dirigidas por el Profesor Losada han recibido ayudas para su financiación (superior a 150 millones de pesetas en los últimos 15 años) por parte de diferentes instituciones, entre las que podemos mencionar, Junta de Energía Nuclear, Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica, Secretaría de Estado de Universidades e Investigación, Centro de Estudios de la Energía (Ministerio de Industria y Energía), Dragados y Construcciones, S.A., Philips Research Laboratories (Holanda), National Science Foundation (Estados Unidos) y National Institutes of Health (Estados Unidos).

Junto a su incansable y efectivo trabajo investigador, el Profesor Losada ha desarrollado una no menos productiva labor docente a todos los niveles, que comprenden desde la mera divulgación científica a la formación de investigadores, pasando por su participación en la enseñanza universitaria en general, así como en Seminarios y Cursos internacionales de alto nivel. Como Catedrático de Bioquímica y Biología Molecular en la Universidad de Sevilla, desde 1967, ha contribuido decisivamente a la formación de un elevado número de licenciados y doctores, habiendo tenido un gran papel en el efectivo desarrollo de la Facultad de Biología de esta Universidad, a la que él se incorporó cuando comenzaba como Sección de Biológicas en la antigua Facultad de Ciencias. El haber conseguido una perfecta coordinación entre docencia e investigación en el Departamento, cuya dirección ha ejercido a lo largo de veinte años, es otro de los grandes méritos del Profesor Losada. La brillantez de su trabajo ha cristalizado en la constitución del Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis, como Centro Mixto Universidad de Sevilla-CSIC, habiendo servido, asimismo, como referencia para el establecimiento de otros centros análogos en el país.

Por último y para concluir, quisiera destacar el sentido académico de este Homenaje, en un momento en que la Universidad en general es criticada, a veces por su excesivo academicismo, erróneamente equiparado con burocracia, ineficacia, inmovilismo, etc. Nada más lejos de la realidad ya que pienso que este premio que ha obtenido el Profesor Losada Villasante se debe, entre otras razones, a su inquietud por saber, a su capacidad de innovación y sentido de progreso. El premio de Losada ayuda a que trascienda nuestro trabajo y se genere una cierta confianza social en la Institución universitaria.

**Juan Ramón Medina Precioso**
**Rector Magnífico** ■




LUIS RUIZ DE GOPEGUI
**HOMBRES EN EL ESPACIO**
Serie McGraw-Hill de Divulgación Científica. Madrid, 1996 (2.900 ptas.)

¿Por qué se fue a la Luna? ¿Valió la pena ir a la Luna? ¿Por qué no se ha vuelto desde 1972? Estas preguntas y otros muchos interrogantes tienen su respuesta en *Hombres en el Espacio*. El autor, Luis Ruiz de Gopegui, es una persona entendida en la aventura espacial, es más, formó parte de ella como Director de Programas de la NASA en España desde 1984 a 1994, sumando un total de treinta años su colaboración con la agencia espacial norteamericana.

Por lo tanto, Ruiz de Gopegui sabe muy bien de lo que habla en este libro dividido en tres partes, que tratan del pasado (desde el año 1957 hasta 1973. La llegada a la Luna), presente (desde el año 1971 hasta el 2010. Estaciones espaciales) y futuro (El futuro a medio plazo. ¿Qué ocurrirá en el siglo XXI?).

«La primera y segunda parte de este libro —afirma el autor— intentan ser una modesta contribución a un capítulo muy importante de esa historia, el protagonizado directamente por los primeros astronautas y cosmonautas de nuestro planeta. Por eso se ha intentado que el texto no sea exclusivamente el relato escueto de una serie de misiones espaciales, sino que también se han incorporado pormenores sobre las circunstancias políticas, económicas y sociales que rodearon todos y cada uno de los primeros pasos dados por la humanidad en la exploración del espacio exterior».

La exposición sistemática de los acontecimientos no está reñida con un estilo de narrar atractivo, periodístico, que nos hace entrar en aquellos sucesos, algunos de los cuales alcanzan la categoría de históricos, y que configuraron la carrera espacial, tan ligada a la conquista de la Luna y a otras cosas menos atractivas, como la siniestra carrera armamentística. Una vez que se pisó la Luna y que Armstrong, inspirado, dijo aquello de «un paso pequeño para un hombre, un salto de gigante para la humanidad», la carrera espacial inició su declive pero la aventura del espacio siguió y sigue.

El paso del tiempo puede hacernos ver con cierta nostalgia aquellos días de gloria y emoción, pero las gestas ocultaban sus miserias. Desde un trato muy duro a los astronautas, que verdaderamente arriesgaban sus vidas en las misiones encomendadas, hasta una evidente insolidaridad por parte de EE.UU. y URSS con los demás países de la Tierra, marginados y condenados a ser simples espectadores o poco más.

Hoy tenemos una visión más práctica del espacio; más mercantilizado y lugar ideal para numerosos experimentos científicos. Hoy también es el espacio testigo de una creciente cooperación entre países —haciendo más democrática la aventura espacial— y que se irá incrementando en el futuro. Ese futuro del que habla Gopegui en los capítulos finales: Regreso del hombre a la Luna, La propulsión espacial nuclear, Exploración de Marte, y Construcción de colonias espaciales.

Hay que agradecer al autor el esfuerzo realizado en escribir este libro, que incluye su experiencia personal y la valoración de los sucesos, e informa al lector de la aventura espacial haciéndole creer en ella para que no pierda la ilusión en el futuro de los *hombres en el espacio*.

**Ignacio Bravo** ■

XAVIER BELLÉS
**ENTENDRE LA BIODIVERSITAT**
Ediciones de La Magrana. Barcelona, 1996 (1.200 ptas.)

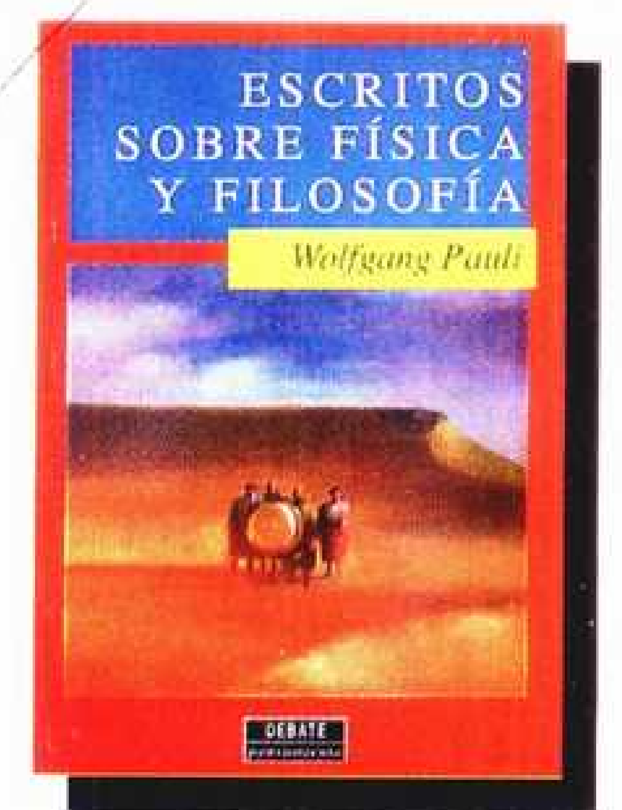
A Xavier Bellés, como a otros muchos biólogos que ya llevamos a la espalda algunos años de vida profesional en la investigación y/o en la docencia, le ha ocurrido algo parecido a aquel famoso personaje de Molière que descubrió, para su asombro, que, sin proponérselo, podía hablar en prosa. Xavier Bellés, sin que seguramente fuera muy consciente de ello hasta hace poco tiempo, ha estado desarrollando toda su actividad en el campo de la biodiversidad, y por partida al menos triple.

Efectivamente, es un entomólogo cuya autoridad taxonómica en algunos grupos raros, especialmente troglobios, es reconocida internacionalmente, es, asimismo, un buen conocedor de los medios de los medios hipogeos en los que moran los extraños organismos que estudia. La espeleología y la biología y sistemática de los insectos cavernícolas constituyen, sin embargo, su violín de Ingres, puesto que (y ésta es su tercera conexión con la biodiversidad)su actividad profesional cotidiana se relaciona con la identificación de los productos naturales de los insectos y su actividad química y biológica, así como con la eventual aplicación de dichos productos en los asuntos humanos.

Por ello difícilmente encontraríamos en nuestro país un profesional de la biodiversidad más capacitado para condensar en un centenar y medio de páginas de alta divulgación, dirigidas a un público no especializado, una introducción a la biodiversidad y sus problemas actuales y futuros.

Ya sea como introducción a los textos sobre biodiversidad y ecología, ya como breviario completo en sí mismo, este libro es recomendable.

**J.R.** ■




WOLFGANG PAULI
**ESCRITOS SOBRE FÍSICA Y FILOSOFÍA**
Editorial Debate. Madrid, 1996 (3.500 ptas.)

Diecinueve años tenía tan sólo Wolfgang Pauli cuando publicó tres artículos sobre el complejo tema de la relatividad. Pauli fue discípulo de Arnold Sommerfeld, científico que estimuló de forma decisiva su interés por la ciencia física. Su capacidad para las matemáticas y la física eran tan sobresalientes, que a los ventiún años publicaba en *Enciclopedia* su cuarto artículo sobre la teoría de la relatividad. Un artículo que motivó los aplausos del ilustre relativista Albert Einstein.

El libro *Escritos sobre física y filosofía* es un compendio de algunos de los escritos más interesantes de Pauli, premio Nobel de Física de 1945. En sus páginas, Pauli nos habla de la materia, un tema que ha sido, es y será uno de los fundamentales e ineludibles objetivos de la física. Nos explica, a través de un sendero sembrado de ejemplos sencillos, cómo la idea de complementariedad —apadrinada por Niels Börh— ha hecho posible, dentro del campo de la física, una síntesis de hipótesis contrapuestas y, a primera vista, mutuamente contradictoria.

Pauli filosofa en su obra sobre el nacimiento del concepto matemático de probabilidad, visto como un intento de interpretar, de la forma más objetiva posible, la esperanza subjetiva de que ocurra un único suceso. Comenta los hallazgos teóricos del maestro Börh, explica las contribuciones de Arnold Sommerfeld a la teoría cuántica, y analiza los trabajos sobre espectros de emisión de los elementos químicos, a cargo de Johannes R. Rydberg, y que debían proporcionar la clave para la comprensión del sistema periódico.

Pauli analiza también la situación en que se encuentra la Ciencia, en referencia a su estrecha relación con el pensamiento occidental, y reflexiona sobre las sabias aportaciones del maestro Einstein a la teoría cuántica y, en general, sobre su contribución al desarrollo de la física.

La presente obra es, en definitiva, un muestrario de los pensamientos personales y profesionales de uno de los científicos más importantes del presente siglo, Wolfgang Pauli (1900-1958), profesor de física de Hamburgo, Zurich y Princenton que formuló el principio de exclusión y postuló la existencia de una partícula eléctricamente neutra.

**I.F.** ■

# PUBLICACIONES RECIBIDAS

**EL DERECHO CIVIL ANTE EL RETO DE LA NUEVA GENÉTICA**
De José Enrique Bustos Pueche, Editorial Dikinson, Madrid (2.500 ptas.).

**IBÉRICA Nº 390**
*«Las alteraciones de titanio en la tecnología aeroespacial», Pascual Tarín Remohi, José Antonio García Poggio, Luis Rubio García y A. García Simón, octubre, 1996 (410 ptas.)*

**UNIVERSO Nº 20**
*«Vida interestelar», M. Barceló, edita Antares, Barcelona, diciembre, 1996 (750 ptas.).*

**MUNDO ELECTRÓNICO Nº 271**
*Edición conmemorativa 25 aniversario, edita Boixareu Editores, Barcelona, noviembre, 1996 (1.400 ptas.).*

**INVESTIGACIÓN Y CIENCIA Nº 242**
*«Cerco al cáncer», número monográfico, Prensa Científica, Barcelona, noviembre, 1996 (1.000 ptas.).*

**EL MÉDICO Nº 622**
*«Neumoní por legionella», Francisco Javier Aspa Marco, 22-28 noviembre, 1996 (350 ptas.).*

**NATURE Nº 6.605**
*«Filling In The Blanks in the p53 Protein», American association for the Advancement of Science, Danbury, EE.UU., 8 de noviembre, 1997 ($ 7.00).*

**EL LIBRO DE LA IMAGEN**
*Juan Carlos Sanz, Alianza Editorial, Madrid, 1996 (1.100 ptas.).*

**LA INDUSTRIA DEL GAS EN BARCELONA 1841-1933**
*Mercedes Arroyo Huguet, Ediciones del Serbal, Barcelona, 1996 (3.400 ptas.).*

**MANUEL LOSADA: MAESTRO DE CIENTÍFICOS**
*Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica, José María Vega Piqueras (ed.), Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Sevilla, 1996 (2.200 ptas.).*

**ECOLOGÍA Nº 29**
*Luis Merino, Pepa Mosquera, «En las tripas de un reactor: la recarga del reactor de Trillo», Guadalajara, diciembre, 1996 (400 ptas.).*

**HISTORIA, CON PERSONAJES, DE LOS CONCEPTOS DEL CÁLCULO**
*Antonio José Durán, Alianza Editorial, Madrid, 1996 (2.500 ptas.).*

**DE LA AGRESIÓN A LA GUERRA NUCLEAR**
*Jesús Martín Ramírez y Antonio Fernández-Rañada, Ediciones Nobel, Oviedo, 1996 (2.500 ptas.).*

**EL DESAFÍO SOCIAL DEL SIDA**
*Nekane Basade, Darío Páez, Ricardo Usieto, Henri Paicheler, Jean-Claude Deschamps, Editorial Fundamentos, Madrid, 1996 (1.995 ptas.).*

**MIRADAS DESDE LA INGENIERÍA**
*«Redes e infraestructuras en Madrid», Carmen Gavira, Celeste Ediciones, Madrid, 1996 (2.700 ptas.).*

**INTRODUCCIÓN A LA ARQUITECTURA DE COMPUTADORES**
*Javier Bastida Ibáñez, Edita la Universidad de Valladolid, Secretariado de Publicaciones, 1996 (2.900 ptas.).*

**THE FUTURE OF SCIENCE HAS BEGUN APROACHES TO ARTIFICIAL LIFE AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE**
*«Proceeding of the Fourth International Conference (15-16 December 1994)», Edita la Fondaziones Carlo Erba, Milán, noviembre 1996 (gratuito).*

**COURRIER CERN**
*Revista internacional de la física de altas energías, «Espace: En orbite la physique Les expériences de physique et l'espace», Ginebra, Suiza, octubre, 1996 (gratuito).*

**BYTE**
*«Los chips que cambian el mundo», Barcelona, diciembre, 1996 (900 ptas.).*

# AGENDA

**IX Concurso sobre Medio Ambiente.**
**Para más información:**
Obra Social y Cultural.
Plaza San Fernando 3.
40001 Segovia.
Tel. (921) 44 36 29.
Enero, 1997.

**Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental.**
**Para más información:**
Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial.
Tel. (91) 581 55 00.
Fax (91) 581 55 44.
Enero, 1997.

**XXVIII Curso de capacitación para operadores de instalaciones radiactivas**
**Para más información:**
Univ. Autónoma de Barcelona.
Dpto. de Física.
Srtas. Carmen Baixeras o Margarita Mínguez.
08193 Bellaterra, Barcelona.
Tel. (93) 581 15 08.
Del 20-31 enero, 1997.

**XXVI Curso intensivo sobre antibioticoterapia.**
**Para más información:**
Ultramar Express.
Organización de Congresos.
Diputación 238, 3º.
08007 Barcelona.
Tels.(93) 482 71 40 / 482 71 58.
Del 20-31 enero, 1997.

**Curso avanzado sobre «Valorización de productos lácteos de ovinos y caprinos en el área Mediterránea. Tecnologías actuales y perspectivas de mercado».**
**Para más información:**
Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza.
Apdo. de Correos 202.
50080 Zaragoza.
Tel. (976) 57 60 13.
Fax (976) 57 63 77.
Correo electrónico:
iamz@ciheam.mizar.csic.es
Del 24 febrero-7 marzo, 1997.

**Master en tecnologías de la información geográfica.**
**Para más información:**
Dpto. de Geografía.
Universidad Autónoma de Barcelona.
Facultad de Filosofía y Letras.
Edificio B.
08193 Bellaterra.
Tel. (93) 581 18 91.
Fax (93) 581 20 01.
Febrero-diciembre, 1997.

**Curso sobre la calidad en la comercialización de productos agroalimentarios.**
Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza.
Apdo. de Correos 202.
50080 Zaragoza.
Tel. (976) 57 60 13.
Fax (976) 57 63 77.
Correo electrónico:
iamz@ciheam.mizar.csic.es
Del 10-21 marzo, 1997.

**Congreso de la Sociedad Española de microbiología.**
**Para más información:**
Ultramar Express.
Organización de Congresos.
Diputación 238, 3º.
08007 Barcelona.
Tels. (93) 482 71 40 / 482 71 58.
Del 15-18 abril, 1997.

**Fourth International Symposium on Myelodysplastic Syndromes.**
**Para más información:**
Ultramar Express.
Organización de Congresos.
Diputación 238, 3º.
08007 Barcelona.
Tels. (93) 482 71 40 / 482 71 58.
Del 24-27 abril, 1997.

**Informat 97**
Salón internacional de las tecnologías de la información.
**Para más información:**
Fira de Barcelona.
Dpto. Informat.
Tel. (93) 233 23 14.
Fax (93) 233 23 19.
Del 22-26 abril, 1997.







**Congreso nacional de la Sociedad Española de Cirugía Plástica y Reparadora y Estética.**
**Para más información:**
Ultramar Express.
Organización de Congresos.
Diputación 238, 3º.
08007 Barcelona.
Tels. (93) 482 71 40 / 482 71 58.
Del 27-30 abril, 1997.

**Desarrollo de nuevos productos en el sector agroalimentario.**
**Para más información:**
Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza.
Apdo. de Correos 202.
50080 Zaragoza.
Tel. (976) 57 60 13.
Fax (976) 57 63 77.
Correo electrónico:
iamz@ciheam.mizar.csic.es
Del 5-16 mayo, 1997.

**Medic Vietnam 97.**
Feria Internacional de Medicina Humana, Odontología, Veterinaria.
Organizador: IMAG.
Hanoi, Vietnam.
**Para más información:**
Messe München.
D-800325 München.
Tel. (07/49 89)5107-0.
Fax (07/4989) 5107-506.
Octubre, 1997.

**Baucon Asia 97**
IV Salón Internacional de Materiales de Construcción, Servicios para Obras, elementos y Técnica de la Construcción.
Realización: MMG/OMAG, Singapur.
**Para más información:**
Messe München.
D-800325 München.
Tel. (07/49 89)5107-0.
Fax (07/4989) 5107-506.
Del 8-11 octubre, 1997.

**ROBÓTICA 97**
8º Salón Internacional de la Automatización y Aseguramiento de la Calidad.
**Para más información:**
Feria de Zaragoza.
Carretera Nacional II km 311.
50012 Zaragoza.
Tel. (976) 53 44 20.
Fax (976) 33 06 49.
Del 19-22 noviembre, 1997.

**Regions and the information society.**
**Para más información:**
European Comission.
DG XVI - Regional policy and cohesion.
Mr. Nicola De Michelis.
Unit A/3.
200 rue de la Loi.
Tel. +33/2/295 52 30.
Fax +32/22 96 32 71.
Correo electrónico: "Nicola.DE MICHELIS"@DG16.cec.be

# CONVOCATORIAS Y BECAS

**CENTRO INTERNACIONAL DE ALTOS ESTUDIOS AGRONÓMICOS MEDITERRÁNEOS.**

**• Desarrollo de nuevos productos en el sector agroalimentario.**

*Dirigido a:* titulados universitarios de grado superior directamente relacionados con el tema.

*Contenido básico:* Introducción. Estructura de la cadena de valor alimentaria.
Cambios en el perfil de los consumidores. Formación de las preferencias de los consumidores y toma de decisiones.
Cambios dinámicos en la infraestructura de la comercialización.
Función de la investigación y el desarrollo. Organización y ejecución del desarrollo de los productos. Factores de riesgo en el desarrollo de los productos. Políticas públicas relevantes.

*Fechas:* 5 al 16 de mayo de 1997.

*Lugar:* Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza.

*Matrícula:* 90.000 pesetas; incluye solamente los gastos de enseñanza.

**Para más información:**
Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza.
Apdo. de Correos 202.
50080 Zaragoza.
Tel. (976) 57 60 13.
Fax (976) 57 63 77.
Correo electrónico: iamz@ciheam.mizar.csic.es

**• La calidad en la comercialización de productos agroalimentarios.**

*Dirigido a:* titulados universitarios superiores directamente implicados en la temática del curso.

*Profesorado:* L.M. Albisu, M. Altmann, J.M. Bouquery, E. Canut, F. Díaz Yubero, R. Faillenet, J. Galarza, R. García, L. Gofton, S. Álvarez, L. Herrero, J. Nichols, D. Padberg, S. Pérez, J.M. Planells, A. Ronero, M. Sanz, B. Sylvannder.

*Contenido básico:* marco general. Desarrollo empresarial de una política de calidad. Políticas de diferenciación por calidad.

*Fechas:* 10 al 21 de marzo de 1997.

*Lugar:* Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza.

*Matrícula:* 80.000 pesetas, que incluyen solamente los gastos de enseñanza.

**Para más información:**
Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza.
Apdo. de Correos 202.
50080 Zaragoza.
Tel. (976) 57 60 13.
Fax (976) 57 63 77.
Correo electrónico: iamz@ciheam.mizar.csic.es

**INSTITUTO AGRONÓMICO MEDITERRÁNEO DE ZARAGOZA Y UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA.**

**• Valoración de productos lácteos de ovinos y caprinos en el área mediterránea. Tecnologías actuales y perspectivas de mercado.**

*Dirigido a:* profesionales con titulación universitaria superior y directamente implicados en el tema.

*Profesorado:* A. Addeo, M. Arroyo, Y. Barcina, G. Caja, F. Gobin, G. Jaubert, A. Ledda, J. Marco, T. Massouras, P. Morand-Fehr, C. Peláez, A. Pérez Calleja, M. Ramos, F. Remeuf, M.A. Rodríguez Lopere-na, M. Román, P. Torre.

*Contenido básico:* sistemas de producción ovina y caprina en el Mediterráneo. Biosíntesis de la leche. Constituyentes de la leche de oveja y cabra. Detección de mezclas. Características microbiológicas de la leche de oveja y cabra. Aptitud tecnológica de la leche de oveja y cabra. Quesos. Principales tipos de queso de oveja y cabra. Técnicas de preparación de la materia prima. Enzimas, coagulantes y cultivos iniciadores. Bioquímica de la maduración. Maduración acelerada. Quesos de pasta prensada. Quesos en salmuera. Leches fermentadas y leches de consumo. Nuevas tecnologías. Evaluación sensorial. Sistema de recogida y pago de la leche. Estrategias comerciales. Legislación y normas de calidad para lácteos. Sectores de producción y procesado en distintos países. Practicas. Visitas. Mesa redonda.

*Fechas:* 24 al 28 de febrero y 3 al 7 de marzo de 1997.

*Lugar:* Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Pública de Navarra.

*Matrícula:* 80.000 pesetas, que incluyen solamente los gastos de enseñanza.

**Para más información:**
Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza.
Apdo. de Correos 202.
50080 Zaragoza.
Tel. (976) 57 60 13.
Fax (976) 57 63 77.
Correo electrónico: iamz@ciheam.mizar.csic.es

**CENTRO INTERNACIONAL DE ALTOS ESTUDIOS AGRONÓMICOS MEDITERRÁNEOS.**

**• Economía de los recursos naturales.**

*Dirigido a:* profesionales con titulación universitaria superior y directamente implicados en la temática.

*Profesorado:* F. Amador, D. Azqueta, F. Bonieux, P. Campos, B. Desaigues, I. Hodge, H. Mapp, M. Merlo, M. Potier, T. Rehman, P. Riera, C. Romero, J.C. Suris.

*Contenido básico:* economía de los recursos. Técnicas cuantitativas. Economía medioambiental: aspectos generales, demanda. Recursos no renovables. Recursos renovables. Política de recursos naturales en la región mediterránea.

*Fechas:* 10 al 21 de febrero de 1997.

*Lugar:* Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza.

*Matrícula:* 100.000 pesetas, que incluyen solamente los gastos de enseñanza.

**Para más información:**
Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza.
Apdo. de Correos 202.
50080 Zaragoza.
Tel. (976) 57 60 13.
Fax (976) 57 63 77.
Correo electrónico: iamz@ciheam.mizar.csic.es

**INSTITUTO BARRAQUER.**

**• XI Curso Internacional de Oftalmología.**

*Contenido básico:* patología y cirugía del segmento anterior. Cirugía refractaria. El reto de las nuevas tecnologías en cirugía ocular: córnea, cristalino, glaucoma, retina, vítreo, miscelánea.

*Fechas:* 8 al 11 de junio de 1997.

*Lugar:* Auditorium Diagonal.

*Matrícula:* 50.000 pesetas para los miembros activos del instituto Barraquer, 60.000 pesetas para otros oftalmólogos, 30.000 pesetas para residentes y especialistas en formación profesional, 30.000 pesetas para profesionales no oftalmólogos y paramédicos, y 20.000 pesetas para cooperadores activos del Instituto Barraquer.

**Para más información:**
Instituto Barraquer
Laforja 88.
08021 Barcelona.
Tels. (93) 200 63 11 / 414 67 98.
Fax (93) 209 99 77 / 414 12 88.
Correo electrónico: centel Ø1@sarenet.es
Internet http://www.barraquer.es

**MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA.**

**• Programa de educación ambiental.**

*Dirigido a:* centros escolares, colectivos y particulares de la comarca de Pamplona.
El programa de educación ambiental se configura como una oferta educativa a los centros escolares, alumnado, colectivos y particulares de la comarca interesados en llevar a cabo actividades y programas referentes a los temas del agua, residuos y la comarca de Pamplona como entorno. El programa ofrece recursos materiales y humanos, flexibles y abiertos, que pueden ser utilizados por las personas interesadas de acuerdo con su contexto particular y sus necesidades. La oferta incluye el centro de recursos, el diseño, organización y realización de jornadas, y las visitas a las instalaciones.

*Contenido básico:* ciclo integral del agua: abastecimiento y saneamiento. Consumo y residuos. Reciclaje y recuperación. La comarca de Pamplona.

*Fechas:* curso 96-97.

*Lugar:* Centro de Recursos.

**Para más información:**
Centro de Recursos.
Hermanos Imaz 1.
Tel. (948) 42 31 00.




**RED DE POPULARIZACIÓN DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (RED-POP).**

**• Premio Latinoamericano de Popularización de la Ciencia y la Tecnología 1996-1997.**

*Objetivo:* estimular las actividades de popularización de la ciencia y la tecnología en América Latina y el Caribe, y destacar los esfuerzos e iniciativas que sobresalgan por su creactividad, originalidad, impacto, rigor y aportaciones, tanto a escala nacional como internacional. El premio se otorga cada dos años y se entrega en una sesión especial durante la asamblea general de la Red-POP; en esta ocasión, será durante el mes de abril de 1997 en La Plata (Argentina).

*Requisitos:* dirigido a centros, programas o especialistas con una destacada trayectoria y proyección nacional y regional en el campo de la popularización de la ciencia y la tecnología en América Latina y el Caribe. La presentación de candidatos se realiza a través de los miembros titulares de la Red-POP.

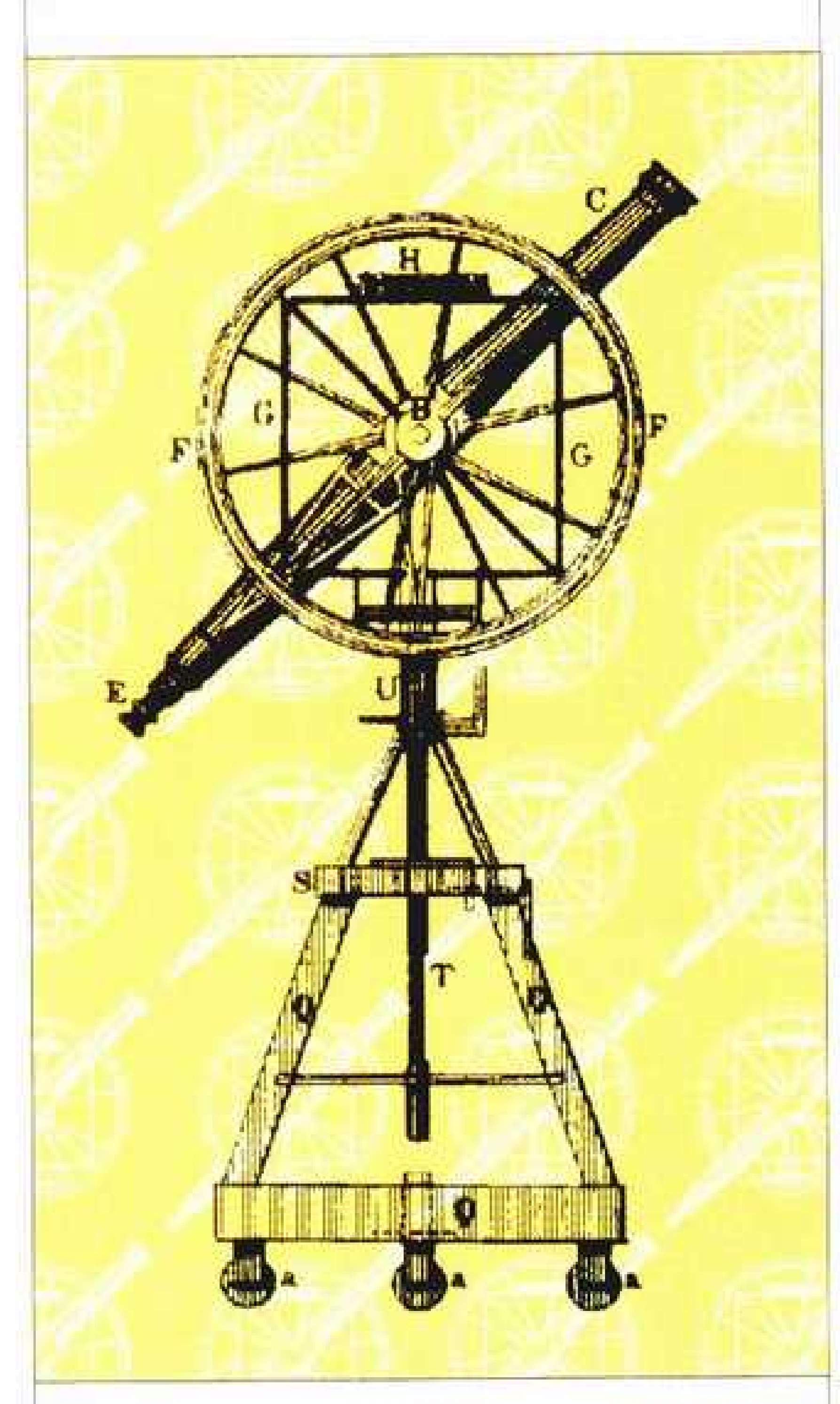
*Selección y jurado:* las candidaturas

serán evaluadas por el comité *ad-hoc* del premio, nombrado *ad-honorem* por la asamblea general de la Red-POP, y juzgadas estrictamente por méritos.
El jurado del premio es independiente, tiene la responsabilidad exclusiva sobre la designación y su decisión es inapelable.
*Cuantía del premio:* 3.000 dólares estadounidenses y un pergamino.
*Plazo de presentación de candidaturas:* 31 de enero de 1997.
**Para más información:**
Secretaría ejecutiva.
Red-POP.
Programa Mundo Nuevo.
Universidad Nacional de La Plata.
Casilla de Correo 301.
1900 La Plata, Bs. As.,
Argentina.
Tel. (54-21) 89 03 29.
Fax (54-21) 89 03 29.
Correo electrónico:
emartinez@unesco.org.uy

**OBRAS SOCIAL Y CULTURAL DE LA CAJA DE AHORROS DE SEGOVIA.**

• **Cinco becas de investigación sobre temas generales o directamente relacionados con la provincia de Segovia.**

*Destino:* tres becas para investigaciones de carácter general, preferentemente de utilidad práctica para la provincia de Segovia, tesis doctorales, ampliación de estudios, etc., y dos becas para estudios de desarrollo endógeno o iniciativas de desarrollo de sectores económicos. Se valorará que puedan enlazar con programas de la Unión Europea y obtener subvenciones de la administraciones públicas. Se podrá solicitar las becas tanto para proyectos sin iniciar como para investigaciones en curso.
*Requisito de los solicitantes:* titulación universitaria de grado medio o superior, o estar matriculado en los dos últimos cursos de carreras superiores, estudios musicales o artísticos; también pueden optar asociaciones y grupos sociales o económicos con personalidad jurídica que acrediten haber realizado acciones, estudios, etc., en beneficio del desarrollo rural de la provincia de Segovia.
*Documentación:* escrito de solicitud, por duplicado, que debe incorporar el título de la investigación y la documentación que se acompaña; currículum de los solicitantes; fotocopia del expediente académico, en su caso; detalle de las actividades, trabajos y estudios realizados en relación con el objeto de la beca solicitada; memoria de la investigación propuesta (objeto, plazos, metodología y presupuesto) de entre cinco y diez folios, y carta de referencia del director de la investigación o personas autorizadas en el tema que acrediten el interés del estudio propuesto y la capacidad del solicitante para llevarlo a cabo.
*Plazo de solicitud:* hasta el 31 de enero de 1997. Las solicitudes se presentarán en la sede de la Obra Social y Cultural (plaza San Facundo, 3. Segovia) o en cualquier oficina de la Caja de Segovia.
*Fecha de concesión:* entre los meses de marzo y abril de 1997.
La selección de candidaturas la realizará un jurado designado por Caja Segovia, compuesto por personas de prestigio en la enseñanza, investigación, economía, etc., y representantes de la caja.
*Cuantía de la beca:* 500.000 pesetas. La entrega se realizará de la siguiente forma: 200.000 pesetas cuando se produzca el fallo del jurado; 150.000 el 30 de septiembre, previa presentación de un informe detallado sobre la marcha de la investigación; 150.000, a la finalización y entrega de los trabajos, si el jurado considera que se adaptan al proyecto presentado.
**Para más información:**
Obra Social y Cultural de Caja Segovia.
Plaza San Facundo 3.
40001 Segovia.
Tel. (921) 44 36 52.




• **Concurso sobre medio ambiente.**

La Caja de Ahorros de Segovia, en el ámbito de su Obra Social y Cultural, organiza, en colaboración con las Jornadas del Paisaje, el presente concurso para la concesión de becas y ayudas a trabajos de investigación y proyectos relacionados con el medio ambiente, con la finalidad de incrementar la sensibilidad de toda la población hacia temas medioambientales y favorecer la conservación del patrimonio natural.
*Destino:* trabajos de investigación, proyectos y propuestas de actuación relacionados con el medio ambiente en la provincia de Segovia.
*Plazos:* la presentación de proyectos finalizará el 31 de enero de 1997. El fallo del jurado se dará a conocer en los meses de febrero o marzo, y los proyectos seleccionados deberán finalizarse antes del 31 de diciembre de 1997.
*Presentación de proyectos:* se realizará en cualquier oficina de la caja, en sobre cerrado en el que se indicará «concurso medio ambiente» y el título del proyecto. El sobre debe contener los datos del solicitante, un breve currículum con indicación expresa de las actividades y trabajos relacionados con el medio ambiente que haya realizado hasta la fecha y una memoria del trabajo que va a realizar.
*Dotación económica:* 400.000 pesetas, que se entregarán de la siguiente manera: 100.000 pesetas cuando se produzca el fallo del jurado; 150.000, el 30 de junio, previa presentación de u informe detallado sobre la marcha de la investigación, y 150.000 a la finalización y entrega de los trabajos, si el jurado considera que se adaptan al proyecto presentado.
**Para más información:**
Obra Social y Cultural de Caja Segovia.
Plaza San Facundo 3.
40001 Segovia.
Tel. (921) 44 36 52.

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE ANDALUCÍA. SEDE IBEROAMERICANA. LA RÁBIDA.**

• **II Maestría de Conservación y Gestión del Medio Natural. Espacios Naturales y desarrollo sostenible.**

*Lugar y fechas:* el módulo teórico y presencial se realizará en La Rábida, del 8 de enero al 7 de marzo de 1997, con un total de 400 horas lectivas. La duración formal del programa es de 20 meses, del 8 de enero de 1997 al 7 de septiembre de 1998. El horario durante el módulo presencial será: de lunes a viernes, de 9 a 11 horas y de 11.30 a 13.30; los sábados se dedicará cinco horas por la mañana a exposiciones por grupos de discusión, entrevistas con tutores y preparación de los trabajos de investigación; de lunes a viernes se dedicará tres horas al día a visitas técnicas a parques, lectura de los documentos por parte de los alumnos y realización de los talleres de discusión por grupos; una hora al día se dedicará a taller de informática; finalmente, cada semana se incluirá una o dos conferencias extraordinarias a cargo de destacados especialistas.
*Precio:* 500.000 pesetas.
*Titulación:* el sistema de evaluación consistirá en pruebas individuales y conjuntas realizadas a lo largo de todo el periodo docente. Para la obtención del título de maestría, una vez realizado el módulo presencial, los alumnos habrán de realizar un trabajo de investigación inédito (tesis de maestría) sobre el tema propuesto, dirigido por uno de los profesores de la maestría, cuya definición se perfilará a lo largo del módulo presencial. El tema y el autor deberán ser registrados en esa universidad antes del fin del módulo docente. La monografía deberá ser remitida a esa universidad, junto con el informe favorable del tutor, entre el 7 de marzo de 1998 y el 7 de septiembre de 1998, y será juzgada y calificada por un tribunal de tres miembros elegidos entre los profesores de la maestría. Se calificará con aprobado o aprobado con distinción; si el tribunal no considera la aptitud del trabajo presentado, lo devolverá a su autor para su corrección. Además de la nota, se entregará el título de maestría.
*Contenido básico:* conservación y desarrollo sostenible; gestión de especies, fauna y flora; planificación y ordenación de espacios naturales; gestión integrada de zonas húmedas; gestión de áreas forestales y prevención de riesgo; ordenación, conservación y gestión de los recursos naturales del litoral y los espacios insulares, y gestión de áreas de montaña.
*Director:* Fernando Molina Vázquez, jefe del servicio de Conservación de la Naturaleza, Dirección General de Participación y Servicios Ambientales de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
**Para más información:**
Universidad Internacional de Andalucía.
Sede Iberoamericana de Santa María de La Rábida.
Palos de la Frontera.
21819 Huelva.
Tel. (959) 35 04 52.
Fax (959) 35 01 58.
Correo electrónico:
uniara@uniara.uia.es
http: //www.uniara.uia.es

# BUSCAR, JUGAR, ENCONTRAR

Elisabeth Busser y
Gilles Cohen

## EN MIL PEDAZOS

1

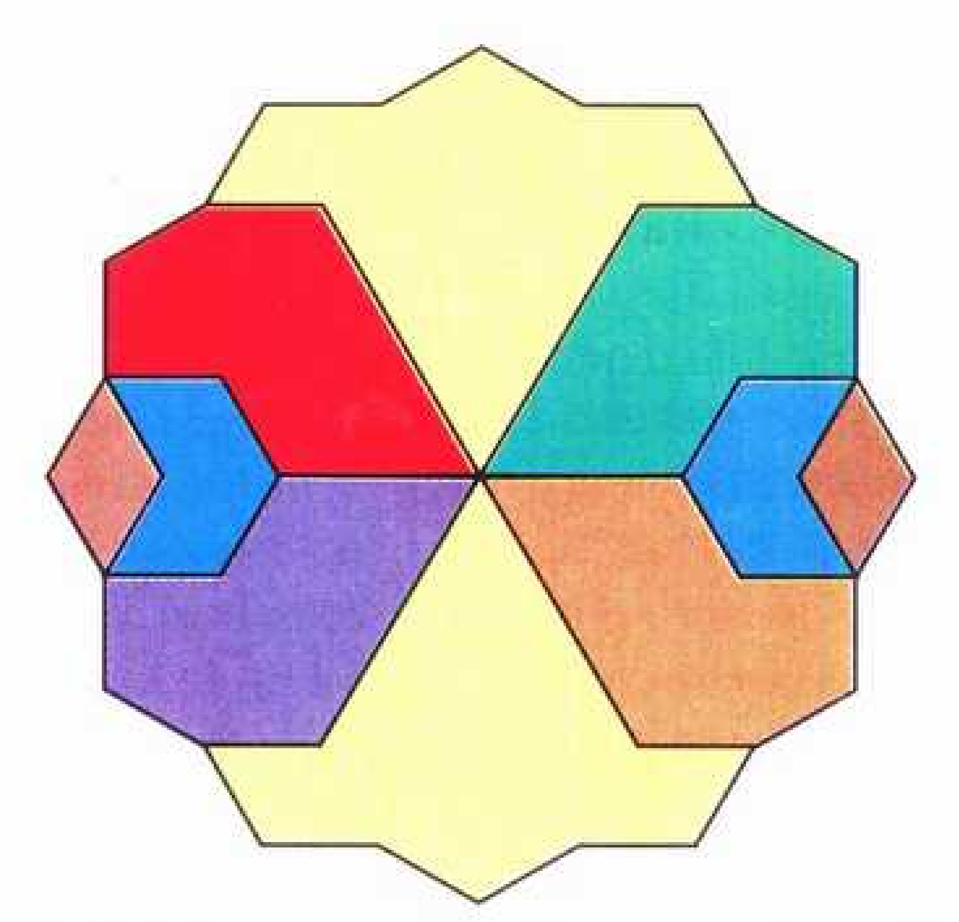
Como demostró Hilbert, es posible dividir cualquier polígono en un número finito de pedazos de tal manera que se pueda reconstruir cualquier otro polígono de área igual. La dificultad, naturalmente, consiste en minimizar el número de pedazos. Esto nos ha dado la idea de algunos rompecabezas, que pasamos a ofrecer.

### A ¿Triángulo o cuadrado?

¿Sabríais, como hizo Dudeney, descomponer un triángulo equilátero en cuatro pedazos que, una vez colocados de manera distinta, permitan formar un cuadrado? Un reto suplementario. Determinad tres puntos de enganche entre los cuatro fragmentos del rompecabezas para formar una cadena, la cual, según se giren los pedazos en un sentido o en el otro, den lugar a un triángulo o un cuadrado.

### B La estrella de Navidad

Bastan diez pedazos para transformar esta estrella de doce puntas (polígono de 24 lados iguales) en una estrella de Navidad (de seis puntas). La descomposición es debida a Lindgren y Frederickson.



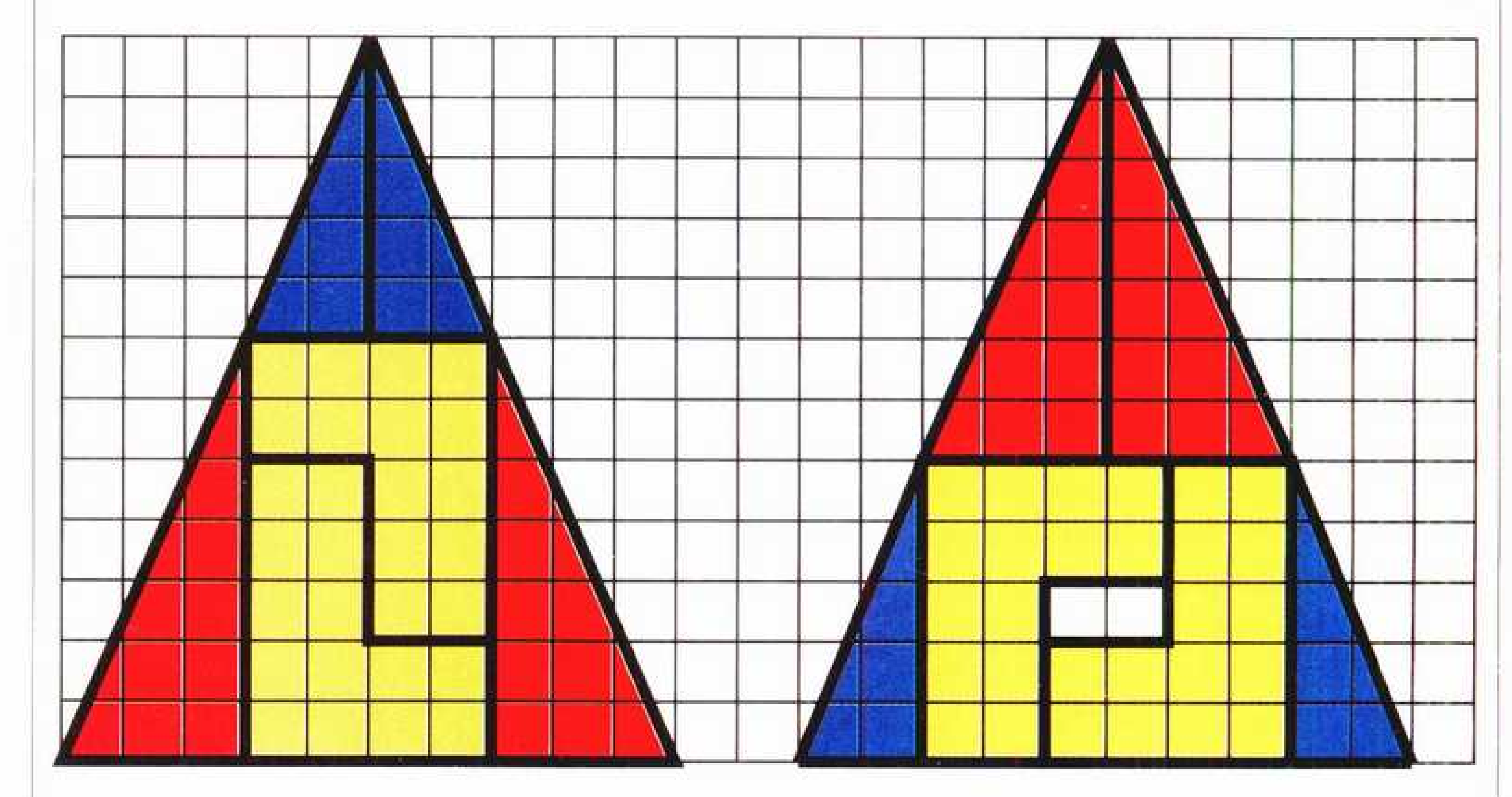
*¿Sabríais reconstruir el rompecabezas?*

### C ¡Triángulos, sólo triángulos!

Se exige ahora que todas las piezas del rompecabezas sean triángulos acutángulos (los tres ángulos agudos).
***¿Cuántas piezas harán falta como mínimo para reconstruir un rompecabezas en forma de triángulo obtusángulo? ¿Y para reconstruir un rompecabezas cuadrado?***

### D Un agujero inexplicable

Observad la figura de la izquierda. El triángulo isósceles está descompuesto en seis fragmentos. Redistribuid ahora los pedazos como en la figura de la derecha. En su centro queda un pequeño agujero rectangular. ¿Se trata de un truco de magia o es posible explicarlo? Esta paradoja aparente es debida a Curry.
El principio se explota desde hace unos meses en los rompecabezas «Quadrix» difundidos en Suiza.



### E ¿Verdadero o falso?

¿Sabríais decir si alguna de las dos afirmaciones siguientes es verdadera? Naturalmente, habrá que justificar la respuesta.

- Siempre es posible descomponer un cuadrado en un número dado de cuadrados.
- Siempre es posible descomponer un cubo en varios cubos pequeños, todos ellos distintos.

### F Rectángulos incomparables

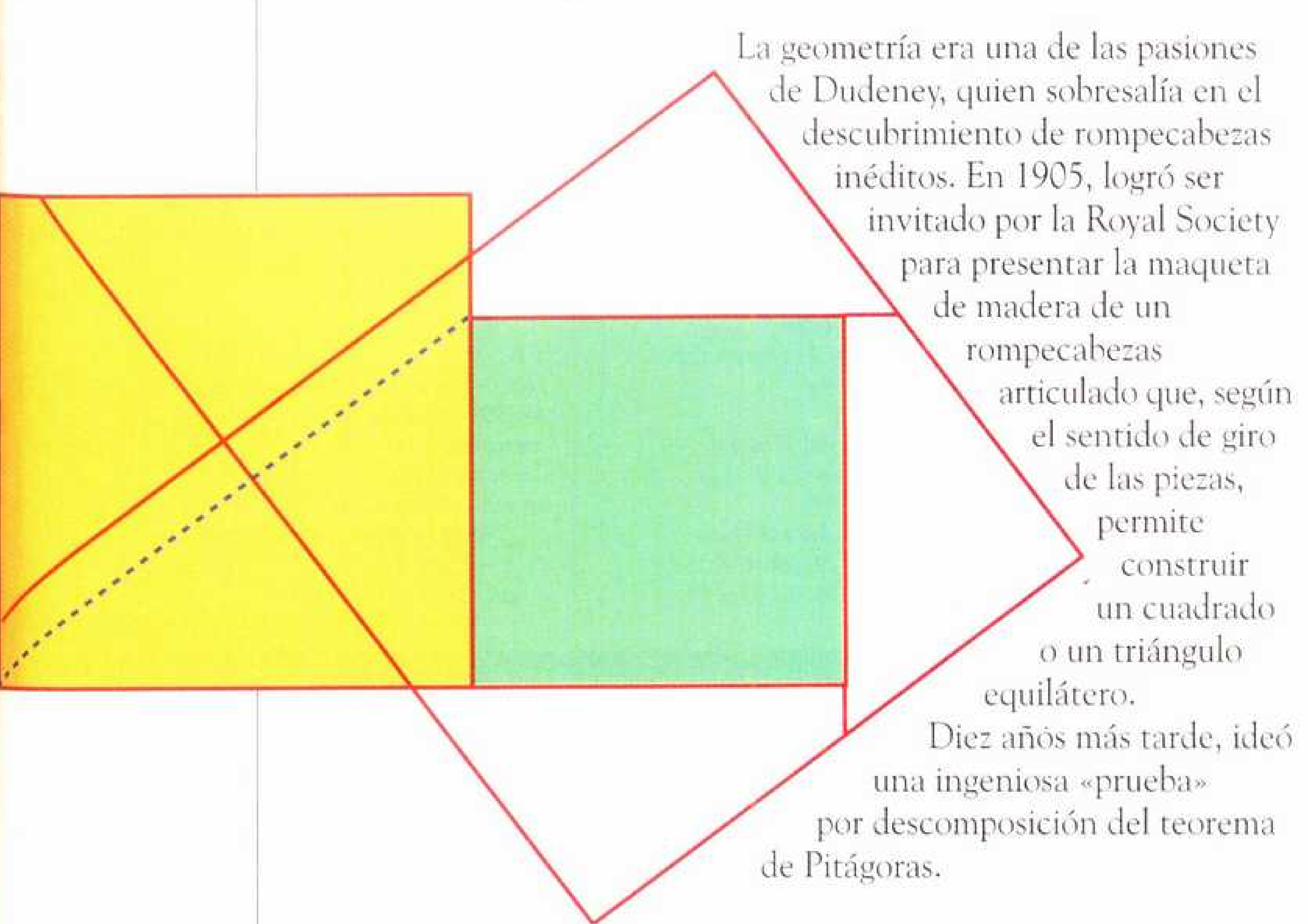
Se exige esta vez que las piezas sean rectángulos «incomparables» dos a dos: dejando sus lados paralelos, tiene que ser imposible inscribir el uno en el otro.
¿En cuántos rectángulos incomparables dos a dos, como mínimo, es posible descomponer un rectángulo dado? (exceptuando el caso trivial de un rompecabezas de una sola pieza).

2

# LOS PASATIEMPOS DE HENRY ERNEST DUDENEY (1857-1930)

Hay personajes que nacen con vocación. Dos circunstancias iban a insuflar en Henry E. Dudeney la pasión por los pasatiempos matemáticos: un espectáculo de ilusionismo dado en su pueblo natal y un juego de «solitario» que le regaló su tía. A los 9 años, el joven inglés escribía ya una rúbrica de adivinanzas en una revista para niños. Una semana antes de su muerte, sesenta y cinco años después, todavía mandaba su crónica de «problemas para el desayuno» al ***Daily News***. Entretanto, este autodidacta —Dudeney se había visto obligado a trabajar desde la edad de 13 años—, bajo el seudónimo de «Sphinx», había fascinado al reino por medio de sus «pasatiempos matemáticos», título de su libro más conocido. Hay muchas similitudes entre el destino de Dudeney y el de Sam Loyd, seis años mayor que él, que tenía a América en vilo con sus juegos y retos (véase ***Mundo Científico***, nº 163). Loyd y Dudeney se conocieron y mantuvieron una relación ambigua, vacilando entre la colaboración —escribieron para el mismo periódico *Tit-Bits*— y la competencia más feroz. Muchos son los problemas que encontramos en ambas obras cuya paternidad es reivindicada por cada autor. Las generaciones de aficionados tendrán la última palabra...

## A El rompecabezas de tres cuadrados



La geometría era una de las pasiones de Dudeney, quien sobresalía en el descubrimiento de rompecabezas inéditos. En 1905, logró ser invitado por la Royal Society para presentar la maqueta de madera de un rompecabezas articulado que, según el sentido de giro de las piezas, permite construir un cuadrado o un triángulo equilátero.

Diez años más tarde, ideó una ingeniosa «prueba» por descomposición del teorema de Pitágoras.

***¿Sabríais decir por qué este rompecabezas es una de tales pruebas por descomposición?***

## B La osadía de Sam Loyd

Cuando el problemista norteamericano Sam Loyd, coronado de gloria, ofreció en 1893 sus servicios a *Tit-Bits*, un periódico en el que escribía Dudeney, a éste no le gustó mucho. Tanto más cuanto que la estrategia de Loyd era hábil, ya que proponía un problema que, según decía, nadie conseguiría revolver. Loyd se comprometía a entregar su remuneración de 100 libras (una suma considerable en aquella época) al primer lector que enviara la respuesta correcta.

Por desgracia para Sam Loyd, muchos lectores hallaron la solución. Dudeney, bajo un nombre falso, condenó en las columnas de *Tit-Bits* la osadía de aquel extranjero que creía insoluble un enigma cuya clave residía en una notación «enseñada en las escuelas inglesas desde tiempos inmemoriales». Sólo dos años después los dos competidores empezaron a colaborar. He aquí el objeto del delito. ¿Lo resolveréis?

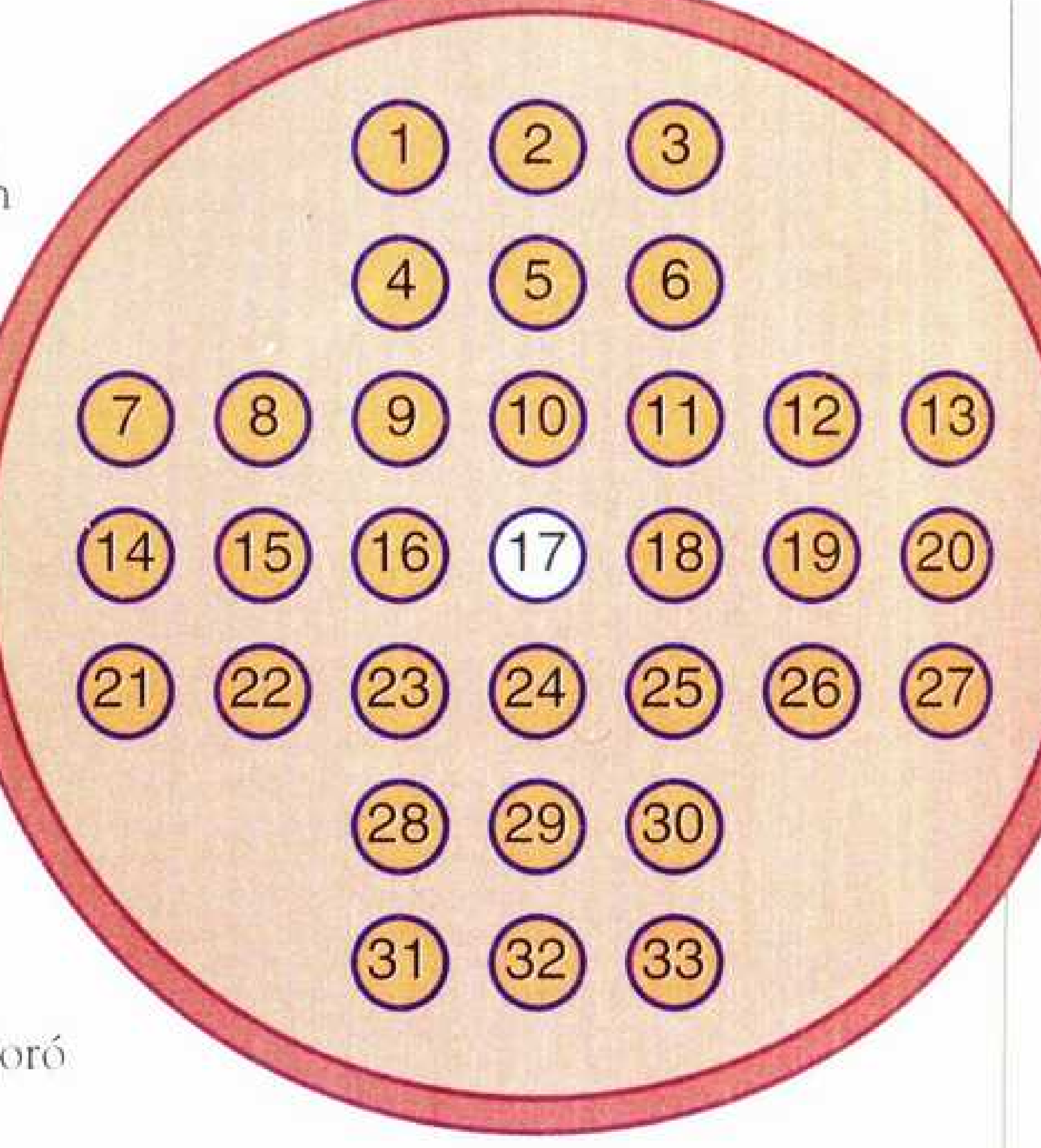
***¿Cómo disponer los símbolos 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0 dentro de una suma de modo que el resultado sea lo más próximo posible a 82?***

## C Amor de juventud

El juego del «solitario» había fascinado a Dudeney desde su más tierna infancia. Esta fascinación no le abandonó, pues en 1908 publicó lo que según él era el récord absoluto de una variante, el «solitario central». El principio del solitario consiste, a partir de la posición inicial en que todos los alveolos, salvo el central (en blanco), están provistos de fichas, en eliminar una por una las fichas de tal modo que la última quede en la casilla central. Se retira una ficha cuando otra le pasa por encima para llegar a una casilla vacía, como en el juego de damas. El salto comiendo es el único movimiento permitido. Como en el juego de damas, Dudeney introdujo lo que llamó la «captura múltiple», que consiste en varias capturas sucesivas con la misma ficha.

***Considerando una «captura múltiple» como un solo movimiento, ¿cuál es el número mínimo de movimientos de una partida de «solitario central»?***

Dudeney publicó una solución, que creía mínima, de 19 movimientos, pero cuatro años después un tal Ernest Bergholt mejoró el récord con 18 movimientos.



# SOLUCIONES A LOS JUEGOS DEL NÚMERO 174

**1 A.**
El tendero posee las ocho pesas siguientes: 1 g, 3 g, 9 g, 27 g, 81 g, 243 g, 729 g y 2.187 g. Con ellas, podrá equilibrar cualquier número entero de gramos comprendido entre 1 y la suma 3.280 gramos.
Los dos secretos de la solución son:
- La numeración en base 3: todo entero se escribe como una suma de potencias de 3 afectadas por los coeficientes 0, 1 o 2.
- Cada 2 se escribe como 3 − 1: el equilibrio se consigue añadiendo un peso al mismo platillo que el objeto a pesar.

Así, 14 se escribe:
$14 = 9 + 3 + 2.1$.
Pero $2 = 3 - 1$, por lo que
$14 = 9 + 2.3 - 1 = 9 + (3 - 1).3 - 1 =$
$= 9 + 9 - 3 - 1 = 2.9 - 3 - 1 =$
$= (3 - 1).9 - 3 - 1 = 27 - 9 - 3 - 1$.
Para pesar un objeto de 14 gramos se pone la pesa de 27 gramos en un platillo y los pesos de 1, 3 y 9 gramos en el platillo que contiene el objeto a pesar.

**1 B.**
El biólogo pone en el platillo de la balanza 1 comprimido procedente de la primera botella, 2 comprimidos de la segunda... 10 comprimidos de la décima. El número de decigramos que faltan en el total de 55 g corresponde al número de la botella que contiene los comprimidos B.

**1 C.**
El biólogo divide sus 55 comprimidos en 3 grupos de 17, 17 y 21 comprimidos. Compara los dos primeros. Tanto si la balanza se inclina hacia un lado como si se mantiene en equilibrio, el problema se reduce a encontrar el comprimido ligero en un grupo de 17 o de 21 comprimidos. Este grupo se divide a su vez en tres montones de 7, 7 y (3 o 7) comprimidos. Los dos primeros se comparan durante la segunda pesada, lo cual permite reducir la elección a 7 o 3 comprimidos. Para 3, basta comparar dos para determinar el resultado en la tercera pesada. A partir de un grupo de 7, una comparación de dos subgrupos de tres permitirá concluir de inmediato en caso de equilibrio o remitirse al caso de un grupo de tres resuelto en la cuarta pesada.

**1 D.**
Sean a, b, c, d, e y f los seis comprimidos. Por hipótesis, no todos son del mismo tipo. En la primera pesada se compara $a + b$ con $c + d$.
- Si la balanza está en equilibrio ($a + b = c + d$), se comparan a y b en una segunda pesada − $a + b + c$ y $d + e + f$ en la tercera. La cuarta pesada opondrá casi siempre e y f, salvo cuando la tercera pesada haya estado equilibrada, en cuyo caso se comparan c y d.
- Si $a + b > c + d$, la situación es más complicada. Se empieza comparando $a + c + e$ y $b + d + f$ en la segunda pesada y se reflexiona...

**1 E.**
En la primera pesada se comparan dos lotes de 3 comprimidos ($a + b + c$ y $d + e + f$).
- Si están equilibrados, se comparan g y h en la segunda pesada, lo cual deja un sospechoso (en caso de equilibrio) o dos sospechosos (en caso de desequilibrio). No queda más que comparar un sospechoso con una buena pieza en la tercera pesada.
- Si $a + b + c > d + e + f$, tenemos tres sospechosos de ser pesados (a, b, y c) y tres sospechosos de ser ligeros (d, e y f). Los otros tres comprimidos son buenos. La segunda pesada opone $a + d$ a $b + e$. En caso de equilibrio quedan dos sospechosos «c más pesado» o «f más ligero». Basta comparar uno de éstos con un buen comprimido para obtener el resultado. En caso de desequilibrio, quedan todavía dos sospechosos, uno de ser pesado y el otro de ser ligero, y se termina como antes.

**1 F.**
Se trata sólo de «comprobar» el etiquetado del cocinero, es decir, de averiguar si tiene razón o no.
El matemático añade un contenedor imaginario de 0 gramos, clasifica los 81 contenedores por orden de pesos crecientes de 0 a 80 y luego compara con el número teórico (según la lista) las diferencias de peso entre los siguientes grupos de 27 contenedores:
- (números del 0 al 26) y (números del 54 al 80);
- (números del 0 al 8, del 27 al 35, del 54 al 62) y (números del 18 al 26, del 45 al 53, del 72 al 80);
- (números del 0 al 2, del 9 al 11, del 18 al 20, del 27 al 29, del 36 al 38, del 45 al 47, del 54 al 56, del 63 al 65, del 72 al 74) y (números del 6 al 8, del 15 al 17, del 24 al 26, del 33 al 35, del 42 al 44, del 51 al 53, del 60 al 62, del 69 al 71, del 78 al 80);
- (números múltiplos de 3 : 0, 3, 6, 9... 75, 78) y (números múltiplos de 3 + 2: 2, 5, 8, 11... 77, 80).

Si todas las diferencias son exactas, la reconstrucción del cocinero es correcta. En efecto, la expresión de los números de 0 a 80 en base 3 exige cuatro cifras (que valen 0, 1 o 2). La verificación del primer equilibrio certifica la exactitud de la primera cifra. Se trata, en efecto, de la mayor diferencia posible entre dos grupos de 27 contenedores. Asimismo, la segunda cifra queda verificada por la realización del segundo equilibrio, la tercera por el tercer equilibrio y la cuarta por el cuarto equilibrio.

**2 A.**
Gauss escribió la suma $1 + 2 + 3 + ... + 100$ e, inmediatamente debajo, la suma $100 + 99 + 98 + ... + 1$. Sumando por columnas, se dio cuenta de que se obtenía 100 por 101. La suma buscada valía, pues, 50 por 101, esto es, 5.050. ¿Luminoso? ¡Al alcance de un Gauss de 8 años!

**2 B**
Hemos hallado 22 descomposiciones de 1996 en suma de tres números triangulares. Entre ellas, dos son incluso descomposiciones en suma de dos números ($T_{61} + T_{14}$), ($T_{48} + T_{40}$). He aquí algunas otras: ($T_{45} + T_{43} + T_{5}$), ($T_{[illegible]} + T_{[illegible]} + T_{10}$), o también ($T_{42} + T_{42} + T_{19}$).

MUNDO CIENTIFICO LA RECHERCHE

CONTENTS Nº 175 JANUERY 1997

**MUNDO CIENTIFICO**

• **ASESOR CIENTÍFICO**
Jaume Josa

• **COMITÉ DE REDACCIÓN**
Mercè Durfort
Ignacio Bravo

• **REDACCIÓN Y COORDINACIÓN**
Ofelia Fayarón

• **REVISIÓN LINGÜÍSTICA**
Mª Vinyet Carmona Modolell

• **DISEÑO GRÁFICO**
Cristina Sabaté
Dolors Cabecerán

**LA RECHERCHE**

• **DIRECTOR GENERAL**
Stéphane Khémis

• **REDACTOR JEFE**
Olivier Postel-Vinay

• **COMITÉ CIENTÍFICO**
Marc Augé • Claude Cohen-Tannoudji
Vincent Courtillot • Antoine Danchin
Jean-Gabriel Ganascia • Elisabeth Giacobino
• Marc Jeannerod • Jean-Claude Lehmann
Jean-Marie Lehn • Claude Lorius
Luc Montagnier • Alain Omont

• **ASESORAMIENTO Y TRADUCCIÓN**
La cosmología de los indios de la Amazonia;
Construir el esqueleto de las células;
El ordenador bajo el encanto cuántico;
¿Es posible erradicar la corea de Huntington?;
Amianto: la extraña epidemia neocaledoniana:
*Jaume Caraldà*; Las incertidumbres
de la era postamianto;
Las lecciones de una discordancia;
Interferometría óptica:
luces y sombras en el Universo:
*Amadeu Montoto*; Japón apuesta por la investigación
fundamental; ¿Se ha inventado la rueda molecular?;
Juegos; Ciencia básica. Especie singular: *Joan Pericay*.

**EDITA**
**RBA Revistas S.A.**
Pérez Galdós 36
08012 Barcelona (España)
Tel. (93) 415 73 74* Fax (93) 217 73 78

**Coordinadora Editorial**
Montserrat Mulero

**Directora Comercial**
Ariadna Hernández

**Directora de Publicidad**
Marta Bellés
**Publicidad**
Elena Ruvireta
Príncipe de Asturias 66
08012 Barcelona
Tel. (93) 415 23 22
Fax (93) 238 07 30

**SUSCRIPCIONES**
Servicio de Atención al Cliente
Pérez Galdós 36
08012 Barcelona (España)
Tel. (93) 415 40 50
Fax (93) 416 00 89
Horario: de 9 a 14 y de 15 a 18 h
(de lunes a viernes)
Resp. Dpto.: Isabel Albareda

**PROMOCIÓN SUSCRIPCIONES**
**Jefes de zona**
Amparo Álvarez Iranzo
Distribución: **Marco Ibérica, S.A.**
Fotomecánica: FOINSA
Impresión-encuadernación: ROTOCAYFO, S.A.
Sta. Perpetua de Mogoda. Barcelona.
B.10.896-81



El precio para Canarias, el mismo de la portada
incluida sobretasa aérea.

AVANCE PRÓXIMO NÚMERO

# MUNDO CIENTIFICO



**LAS INICIATIVAS SEXUALES DE LAS HEMBRAS DE LOS MONOS.**
Desde hace unos veinte años, las observaciones de los primatólogos trastornan la imagen tradicional que adjudicaba a las hembras de los monos un papel de segundo plano en el periodo de reproducción.



**EL FIN DE LOS DINOSAURIOS. LOS TÉRMINOS DE UN DEBATE.**
Un principio sustituye a otro. Si la existencia de una catástrofe cósmica se ha probado definitivamente, su impacto sobre las extinciones de especies da lugar a diversos escenarios.



**BODAS DE FUEGO BAJO UN GLACIAR ISLANDÉS.**
La erupción de un volcán situado bajo el mayor glaciar de Europa ha sido seguida en tiempo real por sismólogos, vulcanólogos y fotógrafos islandeses.



**LA BOMBA INFORMÁTICA DEL AÑO 2000.**
«Tic-tac-tic-tac», dicen los agoreros: prácticamente todos los sistemas informáticos se basan en viejos softwares que, el primero de enero del año 2000, mostrarán un comportamiento explosivo.

...Y ADEMÁS

**CARBONO PARA EMBALAR LA MATERIA** por P. Bernier, A. Loiseau, W. Maser, H. Pascard y F. Willaim

**JUEGOS DE LUZ EN LOS ANILLOS DE SATURNO** por Bruno Sicardy y François Poulet

**LAS PLANTAS PROHIBIDAS DE PATENTE EUROPEA** por Jacques Warcoin

**LA BACTERIA QUE SE CONVIERTE EN HEMBRA** por Dorothée Benoit Browaeys

**UNA CATÁSTROFE CÓSMICA: PRIMERAS CONFIRMACIONES** por J.-C. Doukhan y H. Leroux